

**UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA JOSÉ SIMEÓN CAÑAS
UNIVERSIDAD DON BOSCO**



**“PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO
PARA LAS CALDERAS PIROTUBULARES UTILIZANDO RCM EN LA
INDUSTRIA TEXTIL”**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PREPARADO PARA
LA FACULTAD DE POSTGRADOS UCA**

Y

FACULTAD DE INGENIERÍA UDB

**PARA OPTAR AL GRADO DE:
MAESTRA/O EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

POR:

**AGUILAR ROSA, JUAN FRANCISCO
GUEVARA BARRERA, SOFIA BEATRIZ
MEJIA PORTILLO, ERICK ALEXANDER**

**Diciembre 2023
ANTIGUO CUSCATLÁN, EL SALVADOR, C.A**

Rectores

Andreu Oliva De La Esperanza, S.J.

Mario Rafael Olmos Argueta, SDB.

Secretarias Generales

Lidia Gabriela Bolaños Teodoro

Yesenia Xiomara Martínez Oviedo

Decana de Postgrado UCA

Nelly Arely Chévez Reynosa

Decano de Postgrado UDB

Mario Guillermo Juárez Pérez

Directores de la Maestría en Gerencia De Mantenimiento Industrial

Diana Carolina Cruz UCA

José Luis Martínez UDB

Director de Tesis

Yakdiel Rodríguez Gallo

AGRADECIMIENTOS

Primero a Dios por darnos vida, sabiduría y salud para realizar esta maestría.

A nuestros padres, pilares inquebrantables, por el inmenso amor y apoyo, quienes con oportunas palabras de aliento y confianza fueron de motivación en los momentos desafiantes.

A nuestros compañeros de maestría, por cada momento compartido, ayuda valiosa y desinteresada, por su amabilidad, opiniones e intercambios de ideas, siendo la colaboración esencial para enriquecer nuestros conocimientos.

A nuestro director de tesis Ph.D. Yakdiel Rodriguez, a quien estimamos como maestro y asesor, por su dedicación, orientación y enseñanza a lo largo del proceso. Su guía experta y comentarios constructivos fueron fundamentales para dar forma y enriquecer nuestra formación.

A las personas de la empresa textil, quienes brindaron su disposición para colaborar y compartir información valiosa, su contribución fue un pilar fundamental en el desarrollo de esta tesis.

Finalmente a todas las personas que han sido parte esencial de este camino académico y profesional, brindándonos su valioso apoyo durante el desarrollo de esta maestría.

Nuestro profundo agradecimiento...

... Sofía, Juan y Erick

DEDICATORIAS

Esta tesis está dedicada primeramente a Dios que me ha brindado paciencia y fortaleza para culminar mis metas, a mis hermanos por estar siempre presentes, a mi madre Graciela que con su esfuerzo y dedicación me ha ayudado a lo largo de toda mi carrera universitaria y en memoria de mi abuela María que siempre me animo a seguir preparándome.

Juan Aguilar

A mis amados padres y abuelos, cuyo amor, apoyo y sacrificios han sido mi mayor inspiración y pilar, siempre alentándome a alcanzar mis metas y esforzarme por estas.

A mis amadas hermanas, compañeras, confidentes y cómplices de todos mis viajes. Su apoyo constante y cariño han sido mi indispensable en los momentos difíciles y mi alegría en los triunfos compartidos.

Este logro refleja el amor, la dedicación y el esfuerzo de cada uno de ustedes, convirtiéndolo en una conquista tan suya como mía. Agradezco profundamente por ser mi motivación constante.

Con gratitud y amor.

Sofia Guevara

A mi amada esposa Xenia de Mejía, quien es mi fuente de inspiración, motivación y valentía. Gracias por creer en mí desde el inicio y permanecer a mi lado en cada paso del camino. Tu apoyo, comprensión, ánimo y amor han sido el firme apoyo en los momentos importantes de mi vida. Admiro profundamente la fortaleza en tu interior, que ilumina y guía mi vida en cada nuevo logro.

A mi amada hija Eva Alexandra, lo más bello que Dios me ha regalado, quien es la luz de mi vida, deseo que el esfuerzo que he realizado sea tu ejemplo sobre la importancia de ser trabajador, responsable y perseverante.

A mis padres y abuela, quienes me educaron con sabiduría y amor a lo largo de mi vida, les agradezco por ser mi ejemplo y por enseñarme que se debe buscar alcanzar siempre lo mejor. Su legado perdurará en cada logro que alcance.

Todo lo plasmado es tanto de ustedes como mío, y se los dedico de todo corazón

Erick Alexander Mejía

RESUMEN EJECUTIVO

Propósito: La empresa textil objeto de investigación en El Salvador enfrenta problemas de paros no programados debido a fallas en las calderas de vapor. Por ello, en el presente trabajo se propone la implementación de un plan de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM, *Reliability Centered Maintenance*) con una evaluación sistemática para optimizar el programa de mantenimiento para las calderas pirotubulares en la planta textil.

Métodos: La recopilación de los datos históricos se realizó a través de diagramas, manuales y bitácoras de mantenimiento. Se llevó a cabo un análisis de criticidad de los equipos del área de calderas, mediante el análisis jerárquico (AHP, *Analytical Hierarchy Process*). Posteriormente, se utilizó la norma ISO 14224: 2006, para disgregar la caldera en subsistemas, y cada componente para su estudio detallado. Después, se evaluaron los modos y efectos de fallos, y se calculó el valor de Número de Ponderación del Riesgo (NPR). Las tareas de mantenimiento se asignaron de forma lógica utilizando el diagrama RCM, basándose en el valor de NPR. Para el plan de mantenimiento del sistema de caldera, se determinaron los intervalos de tiempo óptimos utilizando la distribución de Weibull para los componentes más críticos, y para los otros componentes se basó en juicios de experto y en el marco legal del país.

Resultados: Se evaluó la confiabilidad, disponibilidad y viabilidad económica del plan de mantenimiento propuesto, el cual aumentará la confiabilidad y disponibilidad del sistema de calderas en un 16.15% y 0.004%, respectivamente. Además, se podrá ahorrar anualmente hasta un 27.54% del costo de mantenimiento al aplicar el plan propuesto.

Conclusiones: El método propuesto de RCM permite optimizar el plan de mantenimiento de las calderas pirotubulares y supera las limitaciones del modelo clásico, proporcionando un análisis preciso de costos y actividades de mantenimiento. Además, este enfoque subraya la importancia del análisis de confiabilidad para un mantenimiento preventivo efectivo y proporciona una metodología aplicable a otros sistemas en la industria textil.

Palabras claves: Plan de mantenimiento, RCM, confiabilidad, calderas pirotubulares, industria textil.

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO.....	I
ÍNDICE DE TABLAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
SIGLAS	VII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3. PROBLEMA CIENTÍFICO.....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.5. OBJETIVOS	4
1.6. ALCANCE	5
1.7. ESTADO DEL ARTE.....	5
CAPÍTULO 2 GENERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE SISTEMAS DE VAPOR	11
2.1. GENERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE SISTEMAS DE VAPOR	11
2.1.1. Sistemas de Vapor en la Industria.....	11
2.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS CALDERAS DE VAPOR.....	13
2.2.1. Calderas Acuotubulares.....	15
2.2.2. Caldera Pirotubular.....	16
2.3. TIPOS DE MANTENIMIENTOS APLICADOS A SISTEMAS DE VAPOR	18
2.4. APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE VAPOR EN LA INDUSTRIA TEXTIL Y LOS TIPOS DE MANTENIMIENTO APLICADOS	21
2.5. LOS SISTEMAS DE VAPOR EN EL SALVADOR.....	22
2.5.1. Marco Legal y Aplicaciones en la Industria Salvadoreña.....	22
CONCLUSIONES PARCIALES.....	27
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA DEL PLAN DE MANTENIMIENTO RCM	28
3.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA METODOLOGÍA RCM.	28
3.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM.	28
CONCLUSIONES PARCIALES.....	34
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1. ANÁLISIS DE CRITICIDAD AHP.....	35
4.2. PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA CALDERA PIROTUBULAR	47
4.3. DELIMITACIÓN DE CONTORNO.....	49
4.4. ANÁLISIS DE MODO Y EFECTOS DE FALLA A SISTEMA CRITICO	50
4.5. PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO	54
4.6. COMPARACIÓN DE CONFIABILIDAD	60
4.7. ANÁLISIS DE COSTOS	65
4.7.1. Costos del Plan de Mantenimiento Actual.....	65
4.7.2. Costos del Plan de Mantenimiento Propuesto	66
4.7.3. Reducción de Costos	71
4.8. PLAN DE IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA.....	74

4.9. RIESGO OPERACIONAL	77
CONCLUSIONES PARCIALES.....	77
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
5.1. CONCLUSIONES	78
5.2. RECOMENDACIONES.....	78
REFERENCIAS	79
ANEXO A INFORME PERICIAL Y CONSTANCIA DE FUNCIONAMIENTO DE GENERADORES DE CALOR (CALDERAS)	A-1
ANEXO B BITACORA DE MEDICIONES CALDERAS.....	B-1
ANEXO C ENCUESTA	C-1
ANEXO D MATRIZ AMFEC.....	D-1
ANEXO E PLAN DE MANTENIMIENTO	E-1
ANEXO F CALCULO θ Y β POR DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL.....	F-1
ANEXO G CALCULO DE MTTF MEJORADO	G-1
ANEXO H CÁLCULO DEL COSTO ANUAL DEL MANTENIMIENTO ACTUAL.....	H-1
ANEXO I CÁLCULO COSTO ANUAL DE MANTENIMIENTO PROPUESTO.....	I-1
ANEXO J CÁLCULO DE RELACIÓN DE VARIABLES	J-1
ANEXO K AUDITORIA AMORMS (ASSET MANAGEMENT, OPERATIONAL RELIABILITY AND MAINTENANCE SURVEY).....	K-1

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de los tipos de infracciones y sus multas (Ministerio de Trabajo y Previsión Social, 2010a).....	23
Tabla 2.2 Límites máximos permisibles en calderas pirotubulares, acuotubulares, de sistema mixto y equipos de calentamiento indirecto (Aguilar et al., 2002).	24
Tabla 2.3 Calderas por sector, actividad económica y tipo de combustibles en El Salvador (Consejo Nacional de Energía, 2014).....	25
Tabla 4.1 Listado de sistemas dentro del área de calderas a jerarquizar (Elaboración Propia).	35
Tabla 4.2 Valoración de los Juicios de Expertos (Saaty, 1990).	39
Tabla 4.3 Matriz de comparación apareada de los criterios de jerarquización (Elaboración Propia).	40
Tabla 4.4 Escala que permite definir el criterio de frecuencia de fallos (FF) (Parra & Crespo Marquez, 2019).	40
Tabla 4.5 Escala que permite definir el criterio de Detección de fallos (DF) (Parra & Crespo Marquez, 2019).	41
Tabla 4.6 Escala que permite definir el criterio de severidad de fallos (SF) (Parra & Crespo Marquez, 2019).	42
Tabla 4.7 Escala que permite definir el criterio de costes de fallos (CF) (Parra & Crespo Marquez, 2019).	42
Tabla 4.8 Evaluación de los sistemas para cada uno de los criterios seleccionados (Elaboración Propia).....	43
Tabla 4.9 Valores de R para matrices de diferentes órdenes (Teknomo, 2012).....	44
Tabla 4.10 Matriz Normalizada (Elaboración Propia).	44
Tabla 4.11 Estimación del IR y jerarquización de los criterios evaluados (Elaboración Propia).	45
Tabla 4.12 Jerarquización Final de la Evaluación de los equipos en el Área de Calderas (Elaboración Propia).....	45
Tabla 4.13 Ranking Final del Análisis de Criticidad (Elaboración Propia).	46
Tabla 4.14 Clasificación de los subsistemas de la caldera según lineamientos ISO 14224:2016 (Elaboración Propia).	50
Tabla 4.15 Clasificación del índice de gravedad (Gardella González, 2011).	51
Tabla 4.16 Clasificación de frecuencia de fallos (Gardella González, 2011).	52
Tabla 4.17 Clasificación del índice de detectibilidad (Gardella González, 2011).	52
Tabla 4.18 Ponderación de riesgo para todos los componentes de la caldera pirotubular (Elaboración Propia).....	53

Tabla 4.19 Selección de Tareas de Mantenimiento (Elaboración Propia).	54
Tabla 4.20 Valores de θ y β de componentes críticos (Elaboración Propia).....	59
Tabla 4.21 Intervalos de Mantenimiento Recomendados (Elaboración Propia).....	59
Tabla 4.22 Códigos de los componentes para diagrama de bloque de confiabilidad (Elaboración Propia).....	61
Tabla 4.23 Confiabilidad y Disponibilidad de los Componentes (Elaboración Propia).	63
Tabla 4.24 Costos de Mano de obra para caldera (Elaboración Propia).	66
Tabla 4.25 Resumen de Costos Anuales del Plan de Mantenimiento Actual (CM y PM) (Elaboración Propia).....	66
Tabla 4.26 Costos de mantenimiento por componente actual y propuesto (Elaboración Propia).....	69
Tabla 4.27 Proyección de costos de Mantenimiento (Elaboración Propia).	71
Tabla 4.28 Comparativa de Indisponibilidad y vapor no generado anualmente debido a la falla (Elaboración Propia).	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Jerarquización del departamento de mantenimiento de la empresa textil (Elaboración Propia).....	2
Figura 1.2 Evolución del Mantenimiento en la industria (ITCL, 2020).....	6
Figura 1.3 Componentes de programa de RCM (Faragalla et al., 2016)	7
Figura 2.1 Esquema de los componentes fundamentales en Calderas (López Mendoza, 2020).....	12
Figura 2.2 Clasificación de las calderas de vapor (Basu et al., 2012).....	14
Figura 2.3 Esquema de Caldera Acuotubular (IB&M Boilers, 2023).....	16
Figura 2.4 Esquema de Caldera Pirotubular (IB&M Boilers, 2023).....	16
Figura 2.5 Fenómenos esquemáticos de transferencia de calor que ocurren dentro de una caldera pirotubular, según corte transversal en uno de los tubos de humo (Ortiz, 2011).....	17
Figura 2.6 Esquema representativo típico de una caldera pirotubular de tres pasos (Ortiz, 2011).....	18
Figura 3.1 Grupo típico multidisciplinario para la implementación del RCM (Moubray, J., 2004).....	30
Figura 3.2 Taxonomía según estándar ISO 14.224 (ISO, 2016)	31
Figura 3.3 Marco de decisión RCM modificado (Patil et al., 2022).....	32
Figura 3.4 Modelo de RCM del artículo Development of Optimized Maintenance Program for a Steam Boiler System Using Reliability-Centered Maintenance Approach (Patil et al., 2022).....	33
Figura 4.1 Diagrama del funcionamiento del área de calderas con los diferentes sistemas involucrados (Elaboración Propia).....	37
Figura 4.2 Modelo AHP diseñado para jerarquizar los sistemas de la Área de Calderas en la empresa textil (Elaboración Propia).....	39
Figura 4.3 Ficha Técnica de la Caldera Pirotubular (Elaboración Propia).....	48
Figura 4.4 Definición de Contorno según ISO 14224:2016 (ISO, 2016).....	49
Figura 4.5 Diagrama de bloques de los subsistemas y componentes de la caldera pirotubular (Elaboración Propia).....	61
Figura 4.6 Gráfica de confiabilidad vs el tiempo de operación en horas del sistema de caldera (Elaboración Propia).....	65
Figura 4.7 Comparación de costes actuales y los costos propuestos de Mantenimiento (Elaboración Propia).....	70
Figura 4.8 Costos Mensuales de mantenimiento (Elaboración Propia).....	70
Figura 4.9 Comparativa de proyección de Costos de Mantenimiento (Elaboración Propia).....	72
Figura 4.10 Cronograma de Implementación del Plan de Mantenimiento RCM (Elaboración Propia).....	76

SIGLAS

AMFEC		Análisis de Modos de Fallos, Efectos y su Criticidad
BHP	<i>Boiler horsepower</i>	Caballos de potencia de una caldera
BTU	<i>British Thermal Unit</i>	Unidad Británica de Calor
CBM	<i>Condition-Based Maintenance</i>	Mantenimiento Basado en Condición
CI	<i>Consistency Index</i>	Índice de Consistencia
CM	<i>Corrective Maintenance</i>	Mantenimiento Correctivo
CNE		Consejo Nacional de Energía
CONACYT		Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
DR-CAFTA	<i>Dominican Republic - Central America Free Trade Agreement</i>	Tratado de Libre Comercio entre Centroamérica y la República Dominicana
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>	Análisis de modo y efecto de falla
IR	<i>Radius of Inconsistency</i>	Radio de Inconsistencias
ISO	<i>Internacional Organization for Standardization</i>	Organización Internacional de Normalización
LPG	<i>Liquefied Petroleum Gas</i>	Gas de petróleo licuado
MTPS		Ministerio de Trabajo y Previsión Social
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i>	Tiempo medio entre falla
MTTR	<i>Mean Time to Reparation</i>	Tiempo medio de reparación
MYPEs		Micro Medianas y Pequeñas Empresas
NPR		Número de ponderación de riesgo
ONGs		Organizaciones No Gubernamentales
OREDA	<i>Onshore Reliability Data</i>	
PM	<i>Preventive Maintenance</i>	Mantenimiento Preventivo
PdM	<i>Predictive Maintenance</i>	Mantenimiento Predictivo
RBI	<i>Risk-Based Inspection</i>	Inspección basada en riesgo
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>	Mantenimiento Centrado en Confiabilidad
RTF	<i>Run to Failure</i>	Ejecución hasta el Fallo
RTM	<i>Real Time Monitoring</i>	Monitoreo en Tiempo Real
SAE	<i>Society of Automotive Engineering</i>	Sociedad de Ingeniería Automotriz
TSD		Total de Sólidos Disueltos

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La industria textil en El Salvador destaca como una de las principales exportadoras, desempeñando un papel crucial en el impulso de la economía nacional. Su relevancia se manifiesta no solo en la oferta de productos esenciales para los consumidores finales, sino también como una fuente vital de empleo que sostiene económicamente a numerosas familias salvadoreñas. Estados Unidos emerge como el principal socio comercial, gracias a los beneficios derivados del Tratado de Libre Comercio entre Centroamérica y la República Dominicana (DR-CAFTA, *Dominican Republic-Central America Free Trade Agreement*). El posicionamiento de El Salvador como el décimo mayor exportador de productos textiles a este país refleja la importancia estratégica de esta relación. Es necesario destacar la necesidad de respaldar a las Micro Medianas y Pequeñas Empresas (MYPEs) en el sector textil salvadoreño. Las instituciones de apoyo, integradas en la cadena de valor del textil, deben comprometerse activamente en el desarrollo de estas empresas. Existe un considerable potencial para contribuir significativamente a la economía nacional a través de la potenciación de este sector. La participación del gobierno, Organizaciones No Gubernamentales (ONGs) y otras entidades de apoyo, tanto a nivel nacional como internacional, puede catalizar el crecimiento de las MYPEs mediante la implementación de programas que ofrezcan respaldo financiero y asistencial. Estos programas deben orientarse hacia el mejoramiento de aspectos clave, como la especialización e innovación de productos, la adopción de nuevas tecnologías y la optimización de los procesos productivos, entre otros. Paralelamente, se observa un creciente interés en cuestiones medioambientales y responsabilidad social en la industria textil. Esta tendencia resalta la importancia de considerar aspectos como la protección del medio ambiente y el impacto social de estas empresas en el país. En este contexto, el compromiso con prácticas sostenibles y socialmente responsables se posiciona como una prioridad, influyendo positivamente en la percepción y contribución de la industria textil salvadoreña a nivel global (CONAMYPE, 2022).

La entidad objeto de la investigación opera en el sector textil, siendo una empresa especializada en la fabricación de cintas y el ensamblaje de correderas destinadas a diferentes especificaciones de cremalleras utilizadas en la confección de prendas de vestir, tales como chaquetas y pantalones. Por motivos de confidencialidad, se le asigna el nombre genérico de "la empresa textil". La empresa textil en El Salvador cuenta con una planta ensambladora de zippers para suplir a los países de Centro América, además importan materia prima desde otras filiales como el alambre para la cadena, correderas, topes superiores e inferiores para el zipper.

Esta empresa textil cuya historia se remonta a su fundación en Japón en el año 1934, ha consolidado su liderazgo en el mercado global de la fabricación de cremalleras. Gracias a la visión innovadora de su fundador, la empresa ha desarrollado sus propias máquinas y ha asumido la producción de su materia prima. La combinación de la fiabilidad de sus productos y precios competitivos ha llevado a las empresas de confección de prendas a preferir sus cremalleras sobre las de otros fabricantes. En 1970, la empresa estableció una filial en El Salvador, y para el año 2006, había centralizado toda la producción de cremalleras para toda la región centroamericana en su planta, consolidando aún más la confianza de sus clientes, en su mayoría pertenecientes a la industria textil.

En la Figura 1.1 se presenta el organigrama del Departamento de Mantenimiento de Instalaciones, el cual ilustra la estructura jerárquica que abarca desde el Superintendente de Mantenimiento hasta los colaboradores del departamento.

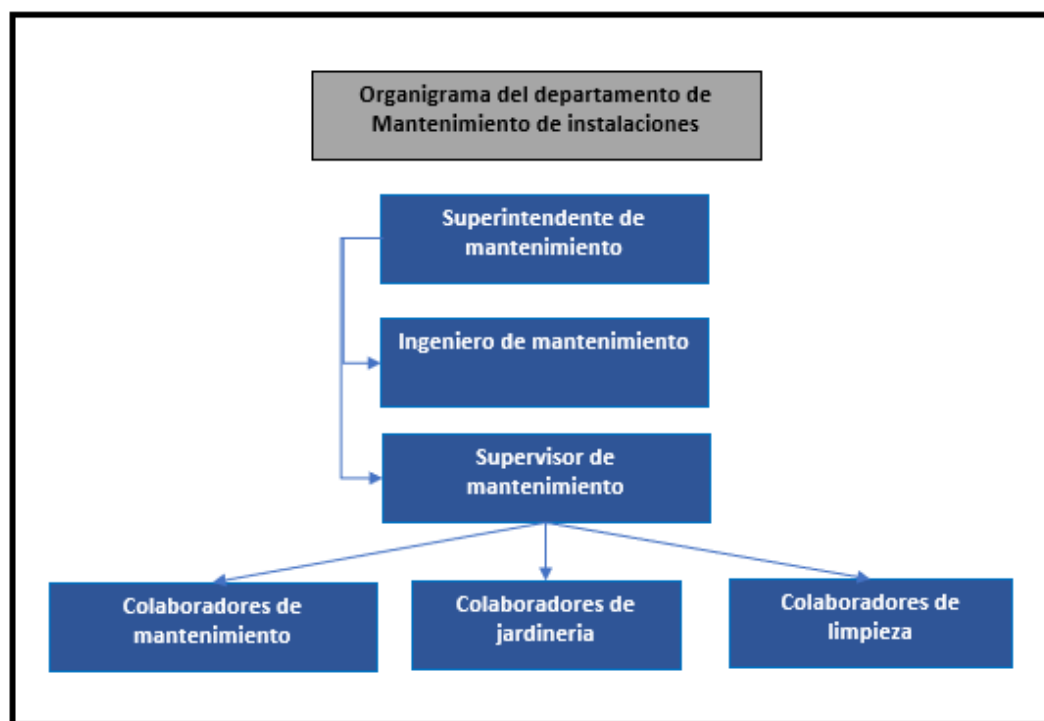


Figura 1.1 Jerarquización del departamento de mantenimiento de la empresa textil (Elaboración Propia).

La empresa opera con dos calderas pirotubulares de 150 BHP (BHP, *Boiler horsepower*) de la marca York Shipley en sus instalaciones. Estas calderas tienen la función de generar vapor utilizado en las operaciones de tintorería, específicamente en las máquinas de teñido, secado y lavado. La estrategia de operación de estas calderas se basa en un ciclo mensual, alternando el uso entre la caldera #1 y la caldera #2.

A lo largo del año, se programan dos mantenimientos preventivos obligatorios para cada una de las calderas: uno en caliente y otro en frío.

Estos mantenimientos preventivos son llevados a cabo por empresas subcontratadas especializadas en la mantención de calderas. Dichas empresas cuentan con peritos certificados, responsables de verificar las condiciones operativas y emitir un informe al Ministerio de Trabajo. Este informe incluye observaciones y, en caso de que la caldera cumpla con todos los requisitos de operación y seguridad ocupacional establecidos en el decreto 87, se emite un permiso de operación.

1.2. Planteamiento del Problema

En noviembre de 2022, se identificó un problema en la caldera #2: se detectó corrosión por picadura o "pitting" en sus tubos, lo que requirió su reemplazo completo. Esta situación implicó una inversión significativa por parte del departamento de mantenimiento. Sin embargo, a pesar de la sustitución de los tubos, la caldera continuó experimentando problemas de fugas de agua en los tubos durante los siguientes siete meses. Esto se debió a defectos en la instalación de los nuevos tubos. A raíz de esta experiencia, se identificó una oportunidad de mejora en el plan de mantenimiento de la caldera, con el propósito de reducir los costos de mantenimiento, incrementar la confiabilidad del equipo y prolongar la vida útil de los activos.

1.3. Problema científico

¿Cómo implementar un plan de mantenimiento para calderas pirotubulares utilizando un enfoque RCM en la industria textil de El Salvador?

1.4. Justificación de la investigación

La elección de este tema de investigación surge de una oportunidad de mejora identificada en el sistema de mantenimiento empleado para dos calderas pirotubulares en la empresa textil en El Salvador. El departamento encargado del mantenimiento en el área de calderas ha implementado un programa de mantenimiento preventivo que, lamentablemente, presenta una eficacia limitada. Esta limitación se deriva de su enfoque en la ejecución de actividades de mantenimiento en función de intervalos de tiempo predefinidos. Esta orientación hacia la temporalidad conduce a un enfoque rutinario del mantenimiento y no se presta suficiente atención a los componentes críticos que inciden en el funcionamiento óptimo de la caldera. Además, no aborda adecuadamente las implicaciones que estos componentes pueden tener en el presupuesto destinado al mantenimiento, la seguridad de los empleados, la integridad de las instalaciones, la protección del medio ambiente y el rendimiento global de la planta de producción.

Históricamente, no se ha realizado una evaluación exhaustiva sobre cómo optimizar el plan de mantenimiento. Por lo tanto, la aplicación del enfoque RCM se considera una estrategia proactiva para aumentar la confiabilidad y disponibilidad de las calderas, al mismo tiempo que se busca reducir

los costos de mantenimiento. En la actualidad se sigue ejecutando el plan de mantenimiento anual programado que abarca diversas actividades, entre las cuales se incluye el servicio de mantenimiento para las calderas. Este servicio comprende una limpieza interna, la medición de gases ambientales y la elaboración de un informe pericial para cada caldera. En noviembre de 2022, fue necesario llevar a cabo el cambio de todos los tubos de humo de la caldera #2 debido a una considerable degradación por corrosión que podría comprometer la operación segura de la caldera. Mejorar el plan de mantenimiento permitiría un mayor alcance y seguimiento en relación con los equipos y componentes críticos que tienen una mayor probabilidad de falla y cuyas consecuencias podrían impactar significativamente en la producción

Cada vez más empresas salvadoreñas se sienten atraídas por implementar mejoras relacionadas con los costos y la confiabilidad en sistemas de vapor. Esto no solo les permite obtener ahorros económicos, sino también reducir desperdicios y contribuir a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (Argueta, 2023).

El presente trabajo resultará beneficioso para el personal de mantenimiento de la empresa textil, ya que propone una herramienta de gestión de mantenimiento que facilitará el desarrollo de un plan de mantenimiento más eficiente con el objetivo de reducir los costos asociados. Los ahorros potenciales hasta un 27.54%, mediante la optimización de las calderas, se destinarán a la evaluación y desarrollo de nuevos proyectos centrados en el mantenimiento de áreas críticas, la inversión en tecnologías de PdM y la capacitación de los líderes de mantenimiento, seguridad industrial y medio ambiente relacionados con el RCM. Además, la mejora en la disponibilidad de las calderas contribuirá a mantener la producción en varias líneas y alcanzar los objetivos anuales de ahorro energético previamente establecidos.

1.5. Objetivos

Objetivo General

Proponer la implementación de un plan de mantenimiento para las calderas pirotubulares con un enfoque RCM en la empresa textil.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar los modelos de mantenimiento aplicables a los sistemas de vapor e identificar los criterios y parámetros necesarios para la implementación del modelo RCM en calderas pirotubulares utilizadas en la empresa textil.
2. Desarrollar un plan de mantenimiento optimizado para las calderas pirotubulares con enfoque RCM en la empresa textil.
3. Evaluar la viabilidad económica del plan de mantenimiento propuesto y su impacto en los costos de mantenimiento y confiabilidad de las calderas pirotubulares en la empresa textil.

1.6. Alcance

Se propone desarrollar un plan de mantenimiento basado en RCM para las calderas pirotubulares con un enfoque tanto técnico como económico. El objetivo principal de este plan es incrementar la confiabilidad de las calderas, al mismo tiempo que se reduce el riesgo de posibles fallas inesperadas. Esta investigación se presenta como una herramienta útil para el personal de mantenimiento, proporcionándoles detalles sobre los fundamentos de la metodología RCM y cómo puede implementarse específicamente en las calderas pirotubulares

La implementación del plan propuesto estará sujeto a la decisión de la gerencia de mantenimiento de la empresa textil en estudio. Esto se debe a que la empresa sigue un enfoque de mantenimiento basado en una programación anual, en la cual se define la frecuencia de las diversas actividades de mantenimiento.

Esta investigación será beneficiosa tanto para la empresa textil en estudio como para El Salvador en general, ya que ofrece un análisis exhaustivo de diversas técnicas de mantenimiento, con un enfoque particular en la implementación de un programa basado en RCM para mejorar el rendimiento de las calderas pirotubulares.

1.7. Estado del arte

La concepción del mantenimiento ha experimentado una constante evolución, que se ha intensificado en los últimos años debido al aumento de la mecanización, la creciente complejidad de equipos, activos e infraestructuras, la adopción de nuevas técnicas de mantenimiento y, en general, un enfoque renovado por parte de las organizaciones y sus responsabilidades. En la Figura 1.2 se puede ver la evolución de la gestión de mantenimiento en una empresa y su transición hacia el mantenimiento 4.0. Este enfoque, en el contexto de la industria 4.0, busca la digitalización y la integración de tecnologías avanzadas, como el Internet de las cosas, la inteligencia artificial y el análisis de datos, para optimizar las operaciones de mantenimiento industrial. El mantenimiento 4.0 tiene como objetivo principal mejorar la eficiencia, reducir costos y minimizar el tiempo de inactividad a través de la monitorización en tiempo real, diagnóstico predictivo y automatización de procesos de mantenimiento. La interconexión de dispositivos y la recopilación de datos permiten una toma de decisiones más informada, facilitando la transición de un mantenimiento reactivo a uno proactivo y predictivo (ITCL, 2020).



Figura 1.2 Evolución del Mantenimiento en la industria (ITCL, 2020).

Frente a esta avalancha de cambios, el personal encargado de la gestión del mantenimiento se encuentra en la búsqueda de un nuevo camino, un marco de trabajo estratégico que integre estos avances en un modelo coherente. De esta manera, pueden evaluarlos de manera racional y aplicar aquellos que aporten mayor valor tanto para ellos como para sus compañías. Una metodología que precisamente proporciona este esquema de trabajo es conocida como RCM (RCM, *Reliability Centered Maintenance*) (Moubray, J., 2004).

RCM, es una metodología lógica que utiliza la herramienta de análisis de criticidad, efecto y modo de falla para identificar los requisitos de mantenimiento de acuerdo con las consecuencias operativas y de seguridad de cada falla como se muestra en la Figura 1.3 (Fragalla et al., 2016).

RCM presenta un enfoque viable para optimizar el mantenimiento de sistemas al combinar de manera óptima tareas de mantenimiento reactivas, basadas en tiempo, basadas en condiciones y proactivas. Este enfoque ha sido ampliamente adoptado en el ámbito académico y profesional, utilizándose con el propósito de desarrollar planes de mantenimiento que integren diversas estrategias, incluyendo mantenimiento correctivo (CM, *Corrective Maintenance*), mantenimiento preventivo (PM, *Preventive Maintenance*) y mantenimiento predictivo (PdM, *Predictive Maintenance*).

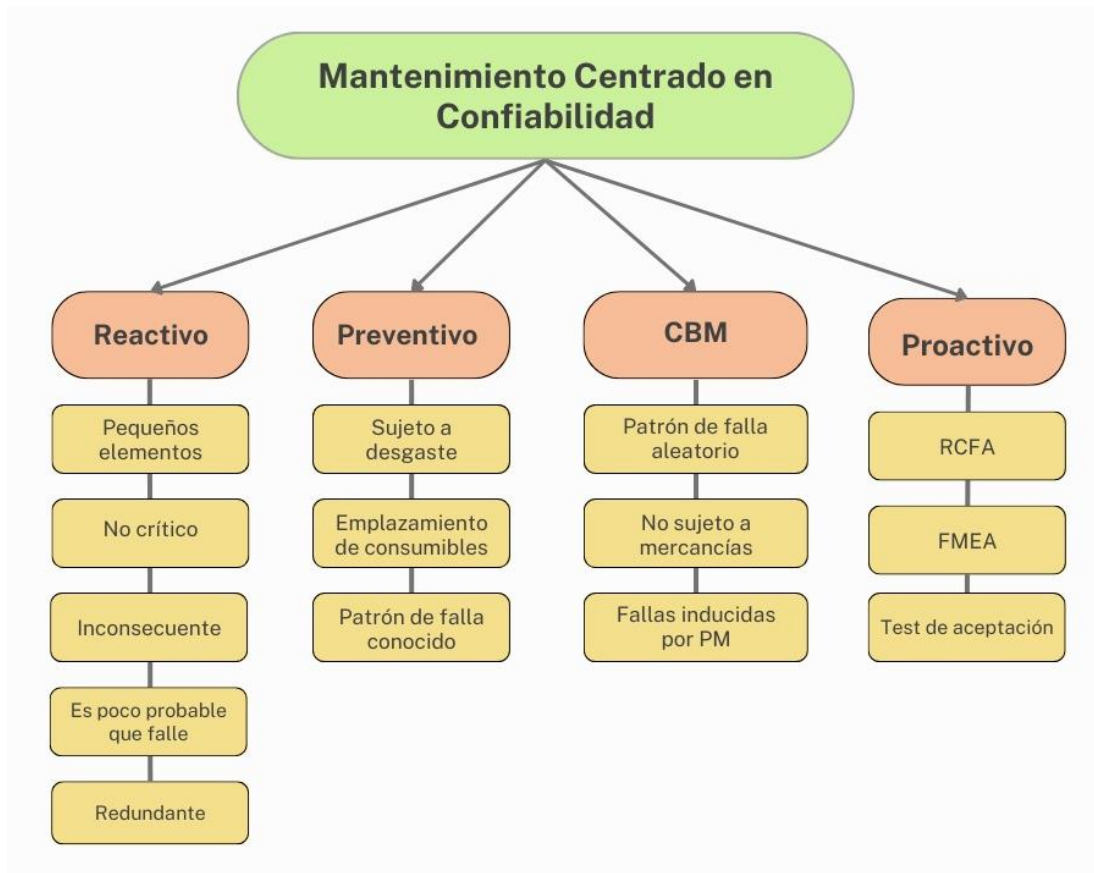


Figura 1.3 Componentes de programa de RCM (Fragalla et al., 2016)

Su origen se remonta al ámbito de la industria comercial de aviación de los Estados Unidos, donde fue concebida con el objetivo de mejorar la seguridad y confiabilidad de los equipos. En 1978, Stanley Nowlan y Howard Heap, empleados destacados de United Airlines, definieron esta metodología, la cual desde entonces ha sido ampliamente utilizada para determinar estrategias de mantenimiento de activos físicos en prácticamente todas las áreas de trabajo de los países industrializados del mundo (SAE, 2009).

En el contexto actual, el campo del RCM ha evolucionado y se han desarrollado diversas metodologías derivadas; no obstante, el núcleo fundamental de esta disciplina permanece sólidamente representado en la norma SAE JA1012 (Campos-López, O., Tolentino-Eslava, G., Toledo-Velázquez, M., & Tolentino-Eslava, R, 2019).

La norma SAE JA1012 complementa esta metodología al presentarse como una herramienta para aquellos interesados en la gestión efectiva de activos físicos mediante la aplicación rigurosa y efectiva del RCM. Esto refuerza la importancia de la investigación continua en este campo. De hecho, varios estudios se han realizado específicamente sobre el mantenimiento para sistemas de vapor, lo que demuestra la relevancia constante de esta área de estudio y su vinculación con el RCM.

El plan de mantenimiento para sistemas de calderas de vapor debe abordar uno de los problemas de deterioro más frecuentes en estos equipos, como señala Betancor (Betancor González, 2018) en su investigación sobre la medición de la corrosión. Este estudio destaca cómo el entorno influye en el desgaste de los artefactos operativos y sugiere que el operador de la caldera, por su conocimiento de la instalación, desempeña un papel crucial al identificar defectos y reportarlos al equipo de mantenimiento. En este contexto, el objetivo del mantenimiento es prolongar la vida útil y disponibilidad de los componentes del sistema de calderas de vapor, lo que a su vez conduce a ahorros significativos para la empresa al reducir el nivel de desgaste.

Para Patil (Bewoor & Patil, 2021) en los procesos de numerosas industrias que dependen de la producción continua, resulta fundamental contar con calderas de vapor eficientes para mejorar la disponibilidad. Identificar los componentes mecánicos críticos basándose en su frecuencia de fallos, confiabilidad y facilidad de mantenimiento se vuelve esencial. En este contexto, reducir la probabilidad de colapsos o pérdidas de potencia durante la operación de las calderas es crucial para evitar costosas reparaciones. La confiabilidad de una caldera de vapor se traduce en la probabilidad de que el equipo desempeñe su función de manera efectiva durante un período de uso determinado. La investigación enfatiza la necesidad de desarrollar un plan de mantenimiento exhaustivo para las calderas de vapor. Esto implica la revisión detallada de todos los componentes del subsistema, a fin de realizar un análisis de confiabilidad y disponibilidad. Posteriormente, se requiere establecer una evaluación constante y preventiva de los aspectos clave de la maquinaria, como el sistema de combustión, el sistema de agua de alimentación y el sistema de purga. Estos sistemas, cruciales desde una perspectiva de confiabilidad, siguen siendo las principales causas de los períodos de inoperatividad en las calderas de vapor.

El mantenimiento desempeña un papel crucial en la mejora de las operaciones en las centrales eléctricas, según sostiene Fuzi, Alnaimi y Nasif (Fuzi et al., 2020). El riesgo y la falla representan problemas comunes en estas instalaciones, pudiendo dar lugar a cortes inesperados, como el apagado de las calderas de vapor. La solución de estos problemas requiere a menudo el cese de las operaciones de las calderas por tiempos prolongados, lo que conduce a una pérdida considerable en los ingresos económicos para la empresa. Por esta razón, en el marco de su investigación, se dio prioridad a la optimización de las actividades de mantenimiento y la reducción de los costos operativos a través de la implementación de un enfoque basado en riesgos para el mantenimiento. Cabe precisar que las centrales térmicas generan energía utilizando turbinas de vapor convencionales y generadores de vapor con carbón, petróleo o gas natural como combustibles para su funcionamiento. En la investigación se resalta que las calderas de vapor son los componentes más críticos dentro de la industria eléctrica debido al mayor costo de mantenimiento que se realiza en esta maquinaria. Según

los autores, la caldera de vapor es la pieza clave para el correcto rendimiento de otros equipos; por lo tanto, el plan de mantenimiento debe considerar la priorización de calderas con riesgo total en términos económicos, de seguridad y ambientales.

Por otra parte, Patil (Patil & Bewoor, 2020) llevó a cabo una investigación sobre las industrias textiles, que consumen una gran cantidad de energía térmica. La demanda de calderas de vapor está experimentando un rápido aumento en la India, y esta creciente demanda puede afectar la capacidad de los sistemas mecánicos de calderas de vapor. El estudio propone un enfoque RCM que utiliza el análisis de confiabilidad mediante el método de juicio de expertos para evaluar las características de la caldera y el modelo de falla de mejor ajuste. Además, se realiza una evaluación de la confiabilidad del sistema junto con los intervalos de PM de todos los componentes.

En otro estudio, Tamajón-Reyes y Mojicar-Caballero (Mojicar-Caballero, 2016) se centraron en llevar a cabo un análisis de fallos en calderas pirotubulares y en comprender el impacto que estos tenían en el medio ambiente. Basaron su trabajo en la teoría de la fiabilidad, aplicando diversas técnicas en las máquinas con el objetivo de determinar las causas de las fallas, así como los efectos que generan en el activo. Establecieron mecanismos para disminuir la frecuencia de fallas, determinar las consecuencias y evaluar el riesgo relacionado con la contaminación. La recurrencia de incidencias de fallos lleva a la conclusión de que está vinculada a una única causa: la falta de buenas prácticas de mantenimiento. En lugar de enfocarse en la prevención, se centraron únicamente en la realización frecuente de tareas relacionadas con la limpieza y la supervisión de las fallas a medida que surgen, corrigiéndolas a medida que el activo envejece. Esto se hace sin un plan de mantenimiento diseñado para satisfacer realmente las necesidades del equipo.

En El Salvador se realizó en la industria azucarera el desarrollo de un plan RCM en el proceso de turbo generación donde se incluye calderas bagaceras, debido a la disminución del 40% en los precios mundiales del azúcar que impactó negativamente en la rentabilidad del negocio. Ante esta situación, identificaron que el mantenimiento era la partida más significativa. Observaron que muchos equipos eran intervenidos anualmente durante la etapa de no producción sin un análisis previo de su desempeño durante la zafra, lo que aumentaba innecesariamente los costos. Por tanto, buscaron mejorar la eficiencia en el mantenimiento para mantener márgenes de rentabilidad adecuados y garantizar su sostenibilidad (Chiquillo Rodríguez et al., 2021).

Finalmente, en otro ingenio azucarero, la aplicación de la metodología RCM a una caldera bagacera, debido a su alta criticidad, reveló costos significativos, incluyendo pérdidas anuales de producción de azúcar y pérdidas por energía no vendida. Además, se registraban altos costos de reparación y tiempos de indisponibilidad durante la zafra. Dada su importancia en la generación de energía eléctrica y vapor para la producción de azúcar, la caldera desempeñaba un papel crucial en el

funcionamiento del ingenio. La implementación del RCM no solo contribuyó a la reducción de los costos de mantenimiento, sino que también aumentó el conocimiento de los operadores y mantenedores, permitiendo focalizar los recursos en las fallas más críticas. Como resultado, se logró disminuir los costos de mantenimiento, incrementando la confiabilidad del activo mediante la eliminación de algunas tareas de mantenimiento preventivo basadas en las nuevas estrategias derivadas del análisis RCM multidisciplinario (Flores Claros & Chávez Posada, 2021).

CAPÍTULO 2 GENERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE SISTEMAS DE VAPOR

En este capítulo, se explorarán diversas aplicaciones a nivel mundial en las que se han implementado sistemas de vapor. También, se presentará una descripción de los componentes y el funcionamiento de estos sistemas, seguida por una revisión de los tipos de mantenimiento más comunes aplicados en estos contextos. Posteriormente, se exponen las aplicaciones en las que estos sistemas resultan útiles. Por último, se examinará el marco legal que regula la operación y el mantenimiento de sistemas sometidos a presión, con un enfoque específico en el contexto de El Salvador.

2.1. Generación de Energía por medio de Sistemas de Vapor

El vapor se forma a partir de la vaporización del agua debido al calentamiento, lo que provoca un aumento en la velocidad de las moléculas y su transición de líquido a vapor. El vapor saturado se forma cuando el agua alcanza un equilibrio con su presión correspondiente a la temperatura. En aplicaciones industriales, el vapor en su estado saturado se perfila como un recurso primordial. Los sistemas de vapor industriales se diseñan para producir vapor de alta calidad y en cantidades adecuadas para las necesidades de los sistemas mecánicos y de procesos en una instalación manufacturera. Las calderas, que utilizan la combustión como fuente de calor, son generadores de vapor comunes y se han utilizado históricamente para convertir calor en energía, especialmente en la extracción de agua de minas (Sabet, 2016)

En la industria, el vapor de agua es un fluido común en motores térmicos para la conversión de calor en trabajo. La generación de vapor implica la separación de la fuente de calor, el proceso de combustión y el fluido empleado. Estos sistemas deben cumplir con códigos ASME, regulaciones locales y nacionales, requisitos de aseguradoras, directrices de proveedores de servicios públicos y estándares de ingeniería reconocidos como buenas prácticas (Singh, 2023).

2.1.1. Sistemas de Vapor en la Industria

A lo largo de más de un siglo y medio, las calderas han encontrado aplicación en diversas naciones de Europa, América, Japón, Sudáfrica, Rusia y Australia. Sin embargo, en concordancia con la rápida industrialización que ha caracterizado al mundo en desarrollo en tiempos recientes, se han observado notables incrementos en las capacidades de generación de energía. Este fenómeno se ha manifestado de manera más marcada en países como China e India (Rayaprolu, 2009).

Los sistemas de vapor desempeñan un papel crítico en la mayoría de los procesos industriales actuales. En sectores industriales clave, una parte significativa del consumo de combustibles fósiles se destina a la generación de vapor. Por ejemplo, la industria alimentaria utiliza un 57% de su energía para este propósito, la industria de pulpa y papel un 81%, la industria química un 42%, la refinación

de petróleo un 23% y la producción de metales primarios un 10%. A nivel global, aproximadamente el 40% de la energía se genera mediante calderas alimentadas con carbón pulverizado y turbinas de vapor, que funcionan bajo el ciclo termodinámico Rankine (Ganapathy, 2002).

Los sistemas de vapor encuentran su ámbito principal de aplicación en los procesos industriales, producción de energía, sistemas de calefacción y otros contextos donde se requieren fluidos a altas temperaturas. Estas estructuras varían en dimensiones y configuraciones, operando con diversas fuentes de energía, como gas natural, petróleo, carbón y electricidad. Es crucial destacar que el mantenimiento adecuado y la operación precisa son aspectos esenciales para garantizar tanto la seguridad como la eficiencia en el rendimiento de las calderas (Singh, 2023).

En la Figura 2.1 se muestran algunos de los componentes fundamentales presentes en la mayoría de las calderas.

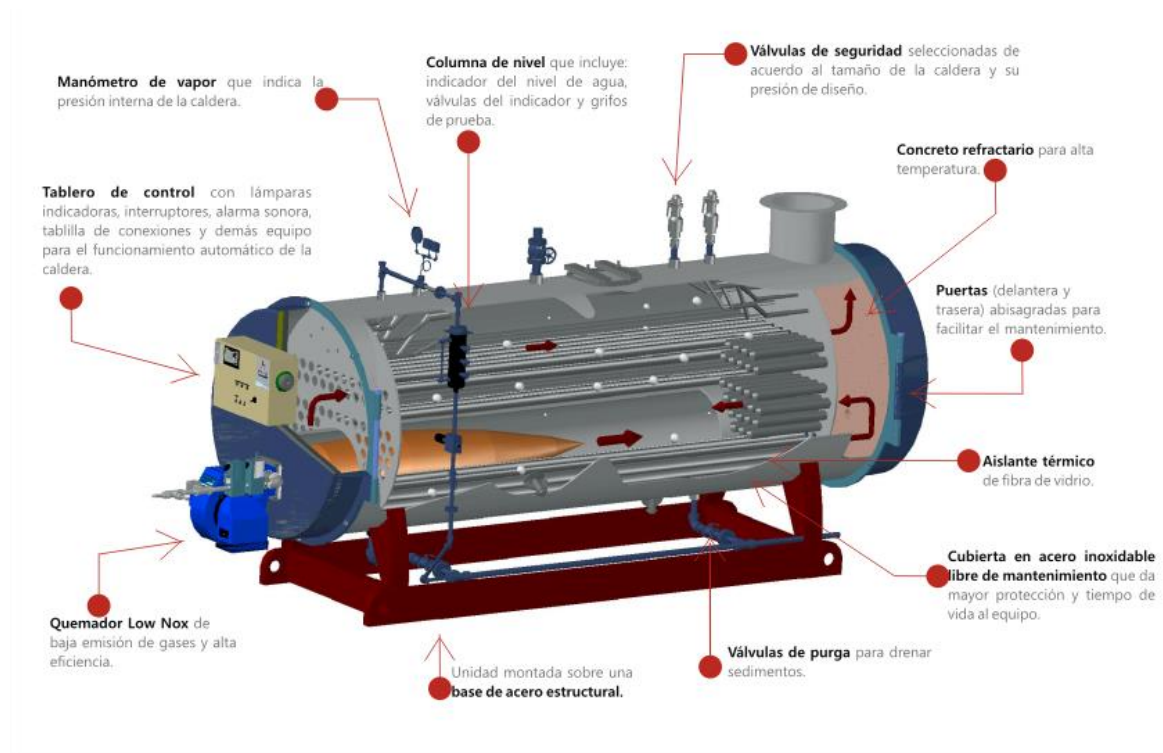


Figura 2.1 Esquema de los componentes fundamentales en Calderas (López Mendoza, 2020).

El vapor se considera una fuente energética óptima debido a las propiedades del agua que facilitan una eficiente transferencia de calor, así como los procesos de vaporización, compresión y expansión. El agua tiene una capacidad excepcional para absorber calor, incrementando su temperatura en 1°F al recibir una Unidad Británica de Calor (BTU, *British Thermal Unit*). La transición del agua al estado de vapor, con su cambio de fase de líquido a gas, requiere 1000 BTU por libra. En el proceso inverso,

cuando el vapor condensa nuevamente en líquido, libera los mismos 1000 BTU de energía calorífica que previamente absorbió (Sabet, 2016).

El vapor desempeña un papel esencial en diversas aplicaciones industriales, incluyendo el tratamiento de agua, el funcionamiento de calderas y sistemas de calefacción. Además, se emplea en el calentamiento de procesos industriales a gran escala y ofrece ventajas significativas en términos de simplicidad, eficiencia y confiabilidad (Universidad Nacional de Tucumán, 2015). El vapor se utiliza tanto en formas directo como indirecto de calentamiento, siendo introducido directamente en la sustancia a calentar en la forma directo, mientras que en la forma indirecto se utiliza un intercambiador de calor para evitar el contacto directo. También se emplea en procesos de atomización, mejorando la eficiencia de la combustión en calderas y generadores de vapor que utilizan petróleo como combustible (Lineró, 2010).

En la generación de electricidad, el vapor sigue siendo esencial, siguiendo el ciclo de Rankine en plantas de energía de vapor. Además, se utiliza en la humidificación para controlar la humedad en sistemas de climatización y ventilación, y en el secado de productos, ofreciendo ventajas económicas y de calidad en comparación con el aire caliente (U.S. Environmental Protection Agency, 2016).

2.2. Caracterización de las calderas de Vapor

El término "caldera" en su esencia más directa evoca la idea de un dispositivo destinado a la vaporización de agua. Desde una perspectiva más rigurosa, una caldera efectúa la conversión de la energía química inherente al combustible en energía térmica del vapor, o en situaciones donde la combustión no interviene, transforma la energía térmica de los gases calientes en energía térmica del vapor. Un precedente ancestral de la caldera lo constituye la tetera, un dispositivo rudimentario que calienta agua para generar vapor (Rayaprolu, 2009).

La variedad de calderas existentes se agrupa según su diseño, aplicación y la fuente de combustible que utilizan. La elección del tipo de caldera a implementar surge de consideraciones específicas ligadas a la aplicación en cuestión, englobando aspectos como las condiciones de temperatura y presión requeridas, la disponibilidad del combustible deseado y la optimización de la eficiencia energética. La clasificación general de las calderas se organiza en varios aspectos clave, estableciendo diversas categorías que definen su diseño, operación y características específicas. Estos aspectos se presentan en la Figura 2.2 para establecer una comprensión integral de los tipos de calderas disponibles y sus aplicaciones.

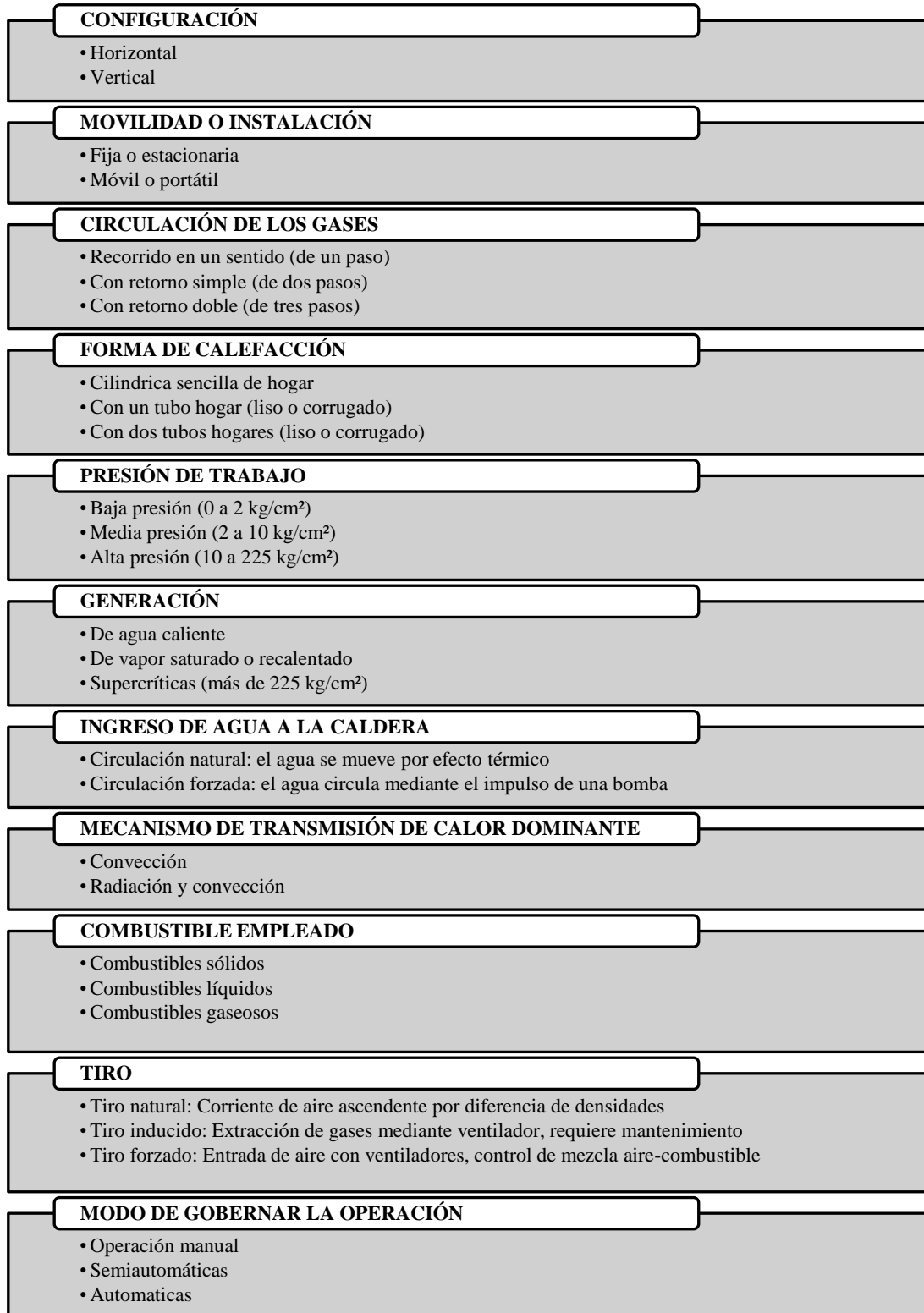


Figura 2.2 Clasificación de las calderas de vapor (Basu et al., 2012).

Desde la configuración hasta los mecanismos de transferencia de calor y combustible, cada aspecto se entrelaza en operación y rendimiento. La presión de trabajo y generación de calor también son cruciales. Un factor determinante es la circulación de gases y disposición de fluidos en tubos, destacando dos grandes tipos de diseño en calderas industriales: **pirotubulares**, con tubos de humo para gases calientes, y **acuotubulares**, que emplean tubos de agua (Basu et al., 2012).

Cada enfoque presenta ventajas y desafíos, resaltando la importancia de seleccionar la caldera adecuada para cada aplicación.

2.2.1. Calderas Acuotubulares

Las calderas acuotubulares, también denominadas calderas de tubos de agua ocupan un lugar preeminente en la ingeniería termo energética. En este tipo de configuración, el fluido sujeto a calentamiento, en este caso, el agua, fluye a través de una disposición longitudinal de tubos. Estos tubos están inmersos en el entorno de la combustión, rodeados por la intensa energía térmica emanada de las llamas y los subproductos gaseosos generados en el proceso de combustión. Esta configuración particular de caldera encuentra su aplicación más destacada en las centrales termoeléctricas, destacándose por su capacidad para soportar elevadas presiones en el flujo de salida y por su destacada habilidad para generar una cantidad sustancial de energía (Bahamondes, 2006).

La operatividad de estas calderas se basa en el alojamiento del agua dentro de los mencionados tubos, dispuestos en una configuración estratégicamente inclinada. Esta inclinación persigue maximizar la superficie de intercambio térmico, lo que, a su vez, promueve un proceso en el cual el vapor, emergiendo con notables temperaturas, induce de manera natural el flujo de agua más fría en la porción inferior. Este enfoque favorece un flujo continuo y eficiente tanto de calor como de fluido. La combustión se inicia en una cámara especialmente diseñada para este propósito, con paredes tubulares que delimitan con precisión el espacio reactivo. Sin embargo, es importante señalar que esta configuración, a pesar de su capacidad para resistir presiones sustanciales, implica una inversión económica más alta y enfrenta desafíos relacionados con la acumulación de impurezas en la sección en contacto con el agua, además de mostrar una inercia térmica reducida en comparación con alternativas disponibles. A pesar de estas consideraciones, las calderas acuotubulares han encontrado una amplia aplicación en centrales eléctricas y diversos entornos industriales. La optimización del diámetro y las dimensiones totales ha permitido conciliar un perfil espacial más compacto con la capacidad de gestionar presiones notablemente elevadas (UNEP, 2004) (Kohan, 2000).

Estas calderas se emplean casi exclusivamente para obtener elevadas presiones y altos índices de rendimiento, con una producción de vapor que varía desde aproximadamente 5 Ton/h hasta grandes producciones de 4000 Ton/h, y tienen la capacidad de manejar presiones de hasta más de 150 bares (Basu et al., 2012).

En la Figura 2.3 se muestra un esquema de la caldera acuotubular.

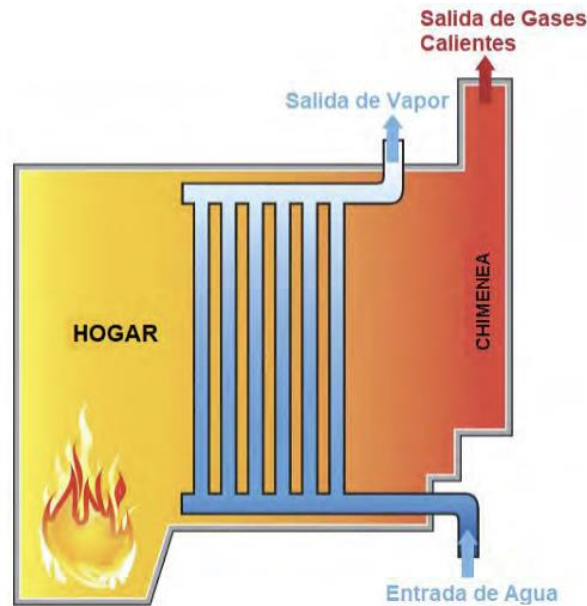


Figura 2.3 Esquema de Caldera Acuotubular (IB&M Boilers, 2023).

2.2.2. Caldera Pirotubular

Las calderas pirotubulares, también conocidas como calderas de tubos de fuego, representan una distinción fundamental en comparación con sus contrapartes acuotubulares, ya que los gases generados durante la combustión circulan a través de los tubos, mientras que el agua se aloja en las paredes internas de la caldera. Estos dispositivos aprovechan al máximo la transferencia de calor mediante mecanismos de convección y radiación. En este tipo de calderas, el fluido en estado líquido se encuentra en un recipiente, rodeando los tubos por los cuales fluyen los gases y el fuego generados por el proceso de combustión, como se ilustra en la Figura 2.4.

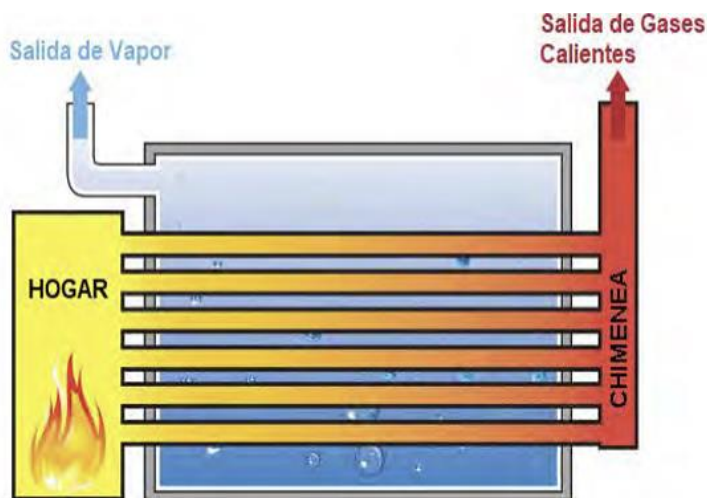


Figura 2.4 Esquema de Caldera Pirotubular (IB&M Boilers, 2023).

En la Figura 2.5 se muestra los fenómenos de transferencia de calor que ocurren en la caldera: transferencia por radiación y convección entre los gases de combustión y la pared de los tubos, conducción a través de la pared de los tubos hacia el agua, transferencia por convección desde los tubos hacia el vapor de agua líquido- mezcla en las diferentes fases. La fase gaseosa se considera gas ideal, y se desprecia la conducción en esta fase. La transferencia de calor desde el gas que llega a la pared de la cámara de combustión se calcula mediante radiación y convección. La componente axial de la radiación puede ser razonablemente despreciada ya que es relativamente pequeño en comparación con el componente radial. Todas las cantidades son iguales en una sección transversal del tubo, es decir, no se producen gradientes de presión y temperatura del fluido en el direcciones radiales y circunferenciales (Ortiz, 2011).

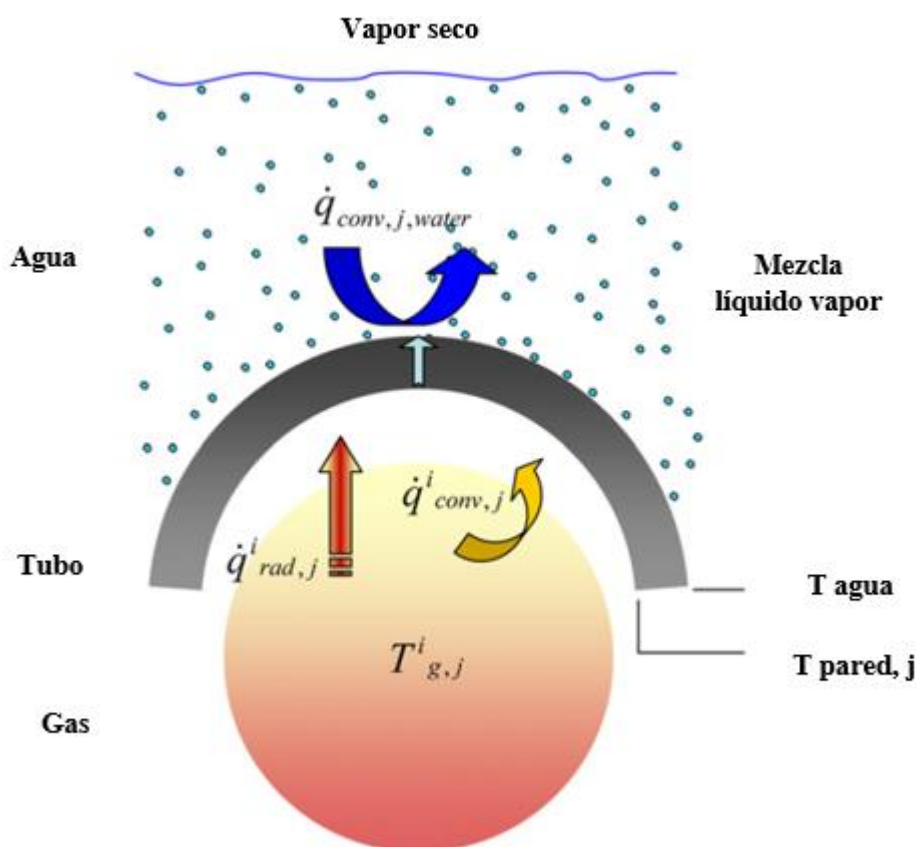


Figura 2.5 Fenómenos esquemáticos de transferencia de calor que ocurren dentro de una caldera pirotubular, según corte transversal en uno de los tubos de humo (Ortiz, 2011).

Por lo general, estas calderas incluyen una cámara de combustión integral conocida como la caja de fuego, que está rodeada por superficies refrigeradas por agua. El diseño interno de estas calderas incorpora tuberías para el transporte de los fluidos, las cuales pueden configurarse en 1, 2, 3 o 4 pasos. En la Figura 2.6 se muestra un ejemplo de una caldera pirotubular de 3 pasos.

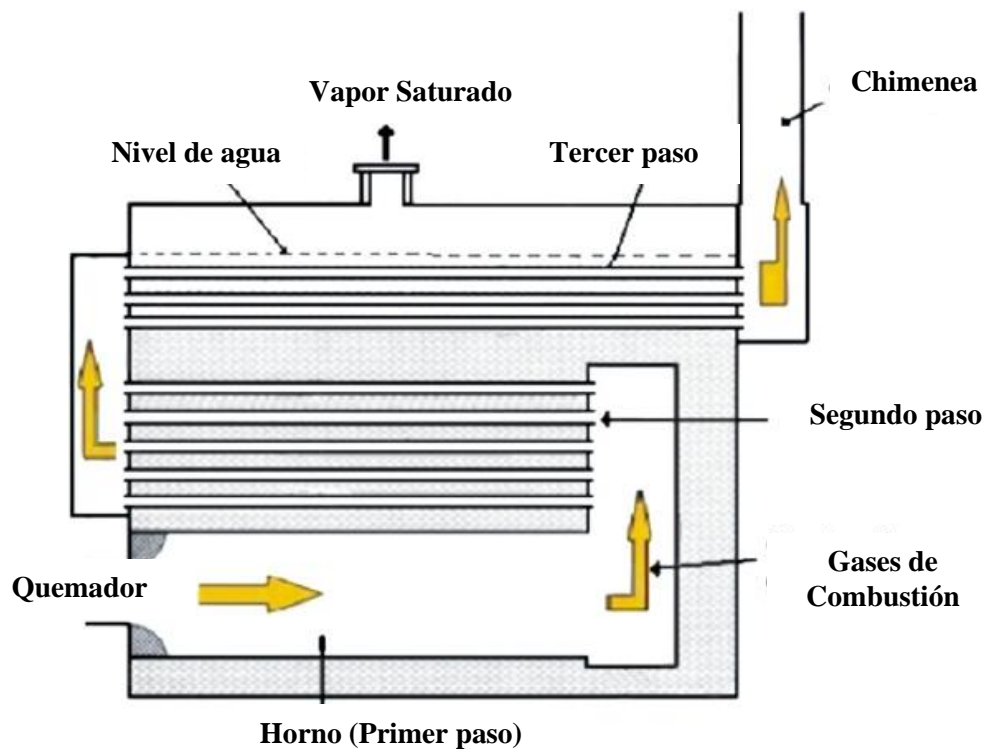


Figura 2.6 Esquema representativo típico de una caldera pirotubular de tres pasos (Ortiz, 2011).

De hecho, el 95% de las calderas industriales de vapor adopta el formato de tubos de humo. A pesar de su importancia en la producción de vapor a nivel industrial, esta categoría presenta limitaciones en términos de capacidad, con un máximo de 1500 CC, y presiones operativas limitadas a un máximo de 20 kg/cm² (Kohan, 2000).

Las superficies internas de las paredes de la cámara de combustión están recubiertas con material refractario. Los gases calientes atraviesan el altar y recorren el fondo de la caldera, retornando hacia la parte frontal a través de los tubos internos. Los productos resultantes de la combustión son finalmente expulsados a través de la chimenea. Este tipo de caldera con tubos de retorno se emplea principalmente en pequeñas centrales industriales debido a sus limitaciones en la producción de vapor, restricciones en las presiones operativas y su moderada velocidad de producción. Su estructura consta de un cuerpo cilíndrico dispuesto horizontalmente que alberga un conjunto multitubular para la transferencia de calor y una cámara superior destinada a la formación y acumulación de vapor (UNEP, 2004). Las calderas pirotubulares son la elección preferida en aplicaciones industriales de baja presión (Basu et al., 2012).

2.3. Tipos de mantenimientos aplicados a Sistemas de Vapor

Para un proceso de mantenimiento de calderas de vapor en una empresa, resulta importante demostrar la búsqueda constante de la excelencia, a fin de equilibrar de manera efectiva el rendimiento, los

riesgos y los ingresos de los recursos, con el propósito último de alcanzar una solución óptima en el ámbito del mantenimiento en cualquier sector industrial. El enfoque estructurado, según Jardine (Jardine & Tsang, 2005), para alcanzar la excelencia en el mantenimiento implica considerar tres tipos fundamentales de objetivos a lo largo del camino: estratégicos, tácticos y de mejora continua. Para lograr este objetivo, se deben tomar decisiones fundamentales sobre cuándo ejecutar las tareas de mantenimiento y la cantidad de recursos, tanto económicos como de otro tipo, que se destinarán para satisfacer las demandas de mantenimiento que la empresa enfrenta. Estas decisiones, impulsadas por información extraída de los datos, llevarán a soluciones óptimas gracias a la labor de los responsables y/o ingenieros de operaciones y mantenimiento.

En este sentido, el Comité Europeo para la Estandarización (ISO, 2016) establece en el ISO 14224:2016 dos categorías principales de mantenimiento: CM y PM, basadas en la experiencia acumulada a lo largo del tiempo en diversas empresas industriales. Estas categorías han enriquecido el conocimiento a través de las mejores prácticas en ámbitos de seguridad, confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de equipos a nivel internacional. En particular, el CM se lleva a cabo con el fin de restablecer un activo después de la ocurrencia de fallos. Para lograrlo, se requiere un historial exhaustivo de fallas de cada equipo de producción, incluso las fallas críticas que puedan dejar inoperante al activo. Posteriormente, se realiza un análisis de causa raíz que involucra el modo, la causa y el mecanismo de la falla. Cabe destacar que el CM en sistemas de vapor se considera la forma más reactiva de mantenimiento, ya que se ejecuta después de que se ha producido una falla. En sistemas de vapor en los que no existe redundancia, la indisponibilidad de una caldera de vapor implica pérdidas significativas en la producción, dada la dependencia de diversos procesos y subprocesos de la energía térmica proporcionada por la caldera. Por otro lado, PM tiene como objetivo anticipar y prevenir fallos en un activo mediante inspecciones y pruebas destinadas a evaluar la condición y el rendimiento del equipo. Además, se requiere el registro detallado de las acciones realizadas en cada activo, con el fin de calcular su confiabilidad y disponibilidad (Palmer, 2013).

En contraste, según Smith (Smith & Hinchcliffe, 2003), el PM adquiere mayor prominencia en comparación con el correctivo en las instalaciones industriales y plantas. Él incluso rechaza el término "mantenimiento reactivo", argumentando que los recursos destinados al mantenimiento han estado históricamente enfocados en abordar fallas inesperadas, descuidando el aspecto preventivo. De acuerdo con Smith, el PM implica tareas de inspección planificadas y programadas con antelación para mantener las capacidades de los activos. Por otro parte, el CM se refiere a tareas no planificadas que surgen imprevistamente y que buscan restaurar las capacidades funcionales de equipos defectuosos.

En la visión de Díaz-Concepción (Díaz-Concepción et al., 2016), las acciones de mantenimiento permiten optimizar los costos y aumentar la disponibilidad y confiabilidad operativa de los equipos, prolongando así su vida útil. Este propone la implementación del "Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad - RCM" como una filosofía de gestión de mantenimiento. Esta metodología, traducida del RCM, se aplica sistemáticamente a activos corporativos con el objetivo de desarrollar un plan estructurado de PM, respaldado por procedimientos, políticas y documentos de gestión específicos para cada activo. Díaz-Concepción enfatiza que esta metodología tiene en cuenta la seguridad, la protección del medio ambiente y la productividad de la empresa, y utiliza herramientas como el análisis de criticidad para el desarrollo de estrategias de mantenimiento.

Por otro lado, Jardine (Jardine & Tsang, 2005) destaca la importancia de la confiabilidad por diseño y del RCM. Mientras que los planes de mantenimiento suelen enfocarse en tareas básicas como limpieza, ajustes y lubricación, el enfoque de RCM busca detectar desgastes tempranos para prevenir fallos en el servicio. Sin embargo, Jardine también propone un enfoque alternativo que mejora la confiabilidad de los activos a través del diseño. En este sentido, un mantenimiento centrado en la confiabilidad es una metodología estructurada que busca determinar el tipo de mantenimiento más adecuado para un activo específico, prescindiendo de tareas rutinarias para concentrarse en trabajos más especializados. La idea es destinar recursos hacia estrategias de mantenimiento, sistemas de información de gestión de mantenimiento, seguimiento y tecnologías novedosas. El objetivo principal de esta herramienta es preservar la función del sistema en lugar de simplemente mantener en funcionamiento el activo. Su implementación exige una comprensión profunda de las funciones de los activos y de las fallas relacionadas con esas funciones. Luego de aplicar estas herramientas, los planes de mantenimiento y confiabilidad deben ser desarrollados adecuadamente mediante la ejecución óptima de las tareas, con el propósito de cumplir de manera segura con los requisitos de confiabilidad y disponibilidad de los equipos de calderas de vapor a un costo sostenible para la empresa. Identificar técnicas de análisis y aplicar tipos de actividad de mantenimiento es crucial en este proceso.

El RCM se destaca como una de las metodologías más conocidas y utilizadas para mantener la eficiencia operativa en sistemas de vapor. Funciona al equilibrar los costos significativos del CM con los costos de las políticas programadas (preventivas o predictivas), todo ello considerando la posible reducción en la "vida útil" del elemento evaluado (Wang et al., 2007) (Sharma et al., 2005).

Finalmente, la aplicación del RCM en sistemas de vapor busca anticipar posibles fallos, entender sus causas y evaluar sus consecuencias, todo ello con el fin de prevenirlos y determinar que acciones se debería tener para preservar los activos físicos, manteniendo su disponibilidad operativa y continúe haciendo la función por la que es requerida en la actualidad (Moubray, J., 2004). Además es una

metodología que permite optimizar los recursos en el mantenimiento, optimizar los costos y mejorar la eficacia del sistema de mantenimiento (Zeinalnezhad et al., 2020). El RCM es capaz de reducir lo mayor posible las actividades del mantenimiento, los costos que involucran reparar los fallos, sin afectar el rendimiento de la producción, la calidad del producto, la seguridad y la salud de los trabajadores (Piechnicki et al., 2019). También es utilizado como un procedimiento para detectar los pasos para el PM de sistemas complejos. El éxito del RCM no solo es reflejado por la confiabilidad de los equipos sino también de los principios y de la adecuada comprensión y aplicación de su concepto (Campos-López et al., 2019). El RCM permite establecer una adecuada estrategia de mantenimiento para cada tipo de fallo que pueda ocurrir, que sirve como base para realizar un nuevo programa de mantenimiento (Prasmoro, 2020). El RCM permite decidir si el equipo es conveniente para el proceso, y determina los cambios de diseño en las necesidades del equipo para nuevas inversiones y la conveniencia del proceso (Rizkya et al., 2019)

2.4. Aplicaciones de los sistemas de vapor en la industria textil y los tipos de mantenimiento aplicados

En esencia, existen tres técnicas fundamentales para optimizar las estrategias de mantenimiento de los sistemas: Mantenimiento Basado en Condición (*CBM, Condition-Based Maintenance*), Mantenimiento Productivo Total (*TPM, Total Productive Maintenance*) y RCM. En el ámbito global, se emplean metodologías de mantenimiento como el RCM en la industria textil con el propósito de potenciar la confiabilidad, eficiencia y seguridad de las calderas, logrando así desarrollar planes de mantenimiento rentables, mediante análisis de función y riesgo.

A continuación, se presentan ejemplos de tales enfoques.

De acuerdo con Islan H. Afety. (Islam H., 2010), en su artículo se detalla la aplicación del RCM en una planta textil de proceso de vapor con un enfoque central en mejorar la confiabilidad de la planta mediante la creación de un plan de mantenimiento financieramente viable. Este plan abarca acciones convencionales de mantenimiento, como PM, PdM, Monitoreo en Tiempo Real (*RTM, Real Time Monitoring*) y Ejecución hasta el Fallo (*RTF, Run to Failure*). La contribución de este artículo radica en la fusión de la evaluación de la criticidad y el RCM en una única metodología aplicable en una planta.

Otro artículo relevante, titulado "Mejora del rendimiento sostenible de las instalaciones de calefacción en una sala de calderas central mediante CBM" (Behzad et al., 2019), demuestra que al implementar estrategias eficaces de operación y mantenimiento, es posible aumentar la sostenibilidad de los sistemas energéticos. La investigación resalta que, para concebir planes de mantenimiento efectivos, es necesario comprender la condición actual de los equipos, lo cual se logra a través de

métodos de monitoreo de la condición. En este contexto, el análisis de vibraciones y la termografía son los métodos considerados.

Por otro lado, Patil ha llevado a cabo una investigación centrada en las industrias textiles, las cuales presentan un alto consumo de energía térmica. En particular, la creciente demanda de calderas de vapor acuatubulares en la India plantea un desafío significativo, ya que podría impactar la eficiencia de los sistemas mecánicos asociados con estas calderas. El estudio propone un enfoque basado en el RCM, empleando el análisis de confiabilidad mediante el método de juicio de expertos para evaluar las características de la caldera y determinar el modelo de falla más apropiado. Además, se realiza una evaluación integral de la confiabilidad del sistema, incorporando los intervalos de Mantenimiento Preventivo (PM) de todos los componentes involucrados (Patil & Bewoor, 2020).

En esta investigación, el RCM es el enfoque principal, ya que ninguno de los otros enfoques puede describir completamente los cuatro puntos siguientes: 1 - Conservar la funcionalidad de un sistema de maquinaria de la misma manera en toda su vida útil 2- Identificar modos de fallo que puedan anular las funciones, 3 – Prioriza la necesidad de la función, y 4- Selecciona solo tareas de mantenimiento preventivo aplicables y efectivas (Moubray, J., 2004).

2.5. Los sistemas de vapor en El Salvador

2.5.1. Marco Legal y Aplicaciones en la Industria Salvadoreña

El Decreto 87 (Reglamento para la Verificación del Funcionamiento y Mantenimiento de Generadores de Vapor) enmarca en la legislación que regula el uso de calderas industriales y generadores de vapor en El Salvador. El artículo 72 de la Ley General de prevención de riesgos en el lugar de trabajo establece que todo empleador está obligado a darle mantenimiento adecuado a los generadores de vapor existentes en el lugar de trabajo, así como presentar a la Dirección General de Previsión Social, el informe pericial y constancia de buen funcionamiento de dicho equipo, según la naturaleza del proceso (Ministerio de Trabajo y Previsión Social, 2010a), (Anexo A). Además, el artículo 72 establece aspectos técnicos relativos a las medidas de seguridad en la instalación, operación, inspección y mantenimiento de equipos sometidos a presión (Órgano Legislativo, 2012).

Este decreto establece normas y procedimientos para la operación, funcionamiento y mantenimiento de generadores de vapor, con un enfoque particular en la prevención de riesgos laborales y la protección del medio ambiente. Este decreto menciona las características que debe de cumplir el cuarto de calderas dentro de una planta de producción para garantizar que el diseño y construcción del piso, las paredes y el techo sea el adecuado para garantizar una operación segura.

En la sección segunda del decreto 87 se mencionan los requisitos de los aparatos auxiliares, accesorios y tuberías que dependen de la presión de operación de las calderas para la correcta selección de las válvulas de seguridad.

Este decreto también menciona todos los aspectos relacionados al peritaje de las calderas. El orden de los peritajes es: peritaje en frío, prueba hidrostática, peritaje de la caldera en operación (en caliente) verificación general y anual de las instalaciones (Caldera en operación). Es obligación de los empleadores realizar dos peritajes al año, de cada caldera, uno será en funcionamiento caliente y el otro en frío, entre uno y otro debe mediar un plazo máximo de seis meses (Órgano Legislativo, 2012) El Decreto 254, que corresponde a la Ley General de Prevención de Riesgos en los Lugares de Trabajo (LGPRLT), establece las regulaciones generales para la prevención y control de riesgos laborales en diversos entornos laborales, incluyendo aquellos que involucran el uso de generadores de vapor y calderas. Además el Decreto 254 establece requisitos de seguridad para garantizar un alto nivel de seguridad y salud de los trabajadores y trabajadoras, frente a los riesgos derivados del trabajo de acuerdo a sus aptitudes psicológicas y fisiológicas para el trabajo, reduciendo al mínimo los riesgos inherentes a las operaciones laborales (Ministerio de Trabajo y Previsión Social, 2010b).

El no acatamiento de las disposiciones establecidas en la Ley General de Prevención de Riesgos en los Lugares de Trabajo (LGPRLT), ya sean acciones u omisiones que incidan en el cumplimiento de dicha normativa y sus reglamentos, constituye una sanción a los empleadores (Ministerio de Trabajo y Previsión Social, 2010a). En la Tabla 2.1 se presentan las infracciones conforme al artículo 77 y al artículo 82 de la LGPRLT.

Tabla 2.1 Clasificación de los tipos de infracciones y sus multas (Ministerio de Trabajo y Previsión Social, 2010a).

Tipo de Infracción	Multas-Salarios Mínimos
Leves	4 a 10
Graves	14 a 18
Muy Graves	22 a 28

El artículo 80 de la Ley General de Prevención de Riesgos en los Lugares de Trabajo (LGPRLT) identifica las sanciones consideradas como muy graves, las cuales están directamente vinculadas a lo dispuesto en el decreto 87. Este último reglamento aborda las condiciones de funcionamiento y las buenas prácticas de mantenimiento que deben observarse en los equipos sujetos a presión (Ministerio de Trabajo y Previsión Social, 2010a).

El Decreto 87 y el Decreto 254 están estrechamente relacionados en el contexto de la operación de generadores de vapor y calderas. Mientras que el Decreto 87 se enfoca en la regulación específica de los generadores de vapor, el Decreto 254 aborda de manera más general la prevención de riesgos laborales. La operación segura de generadores de vapor, en conformidad con el Decreto 87, contribuye directamente a la mitigación de riesgos laborales, cumpliendo así con los principios y objetivos establecidos en el Decreto 254.

En conjunto, estos decretos buscan establecer un marco normativo sólido que asegure la seguridad tanto de los trabajadores como del entorno en el que operan los generadores de vapor y las calderas industriales. El cumplimiento de ambas regulaciones es esencial para garantizar que las instalaciones funcionen de manera confiable, evitando accidentes y asegurando un entorno laboral seguro y saludable.

La Norma Salvadoreña de Emisiones Atmosféricas Fuentes Fijas Puntuales (NSO 13.11.02:11), desarrollada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), establece los límites máximos permisibles de concentración de las emisiones de contaminantes descargados a la atmósfera, generados por las fuentes fijas puntuales, establecidos para proteger la salud y el medio ambiente los límites máximos permisibles para hornos y calderas (Aguilar et al., 2002).

Para la caldera utilizada en la industria textil objeto de estudio por ser mayor de 30 CC debe cumplir con los límites máximos permisibles de la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Límites máximos permisibles en calderas pirotubulares, acuotubulares, de sistema mixto y equipos de calentamiento indirecto (Aguilar et al., 2002).

Contaminante	SIMB	UNIDAD	GLP	DIESEL	BUNKER	BIOMASA
Dióxido de azufre	SO_2	Mg/Nm^3	NA	435	2314	--
Dióxido de Carbono	CO_2	%	Reportar	Reportar	Reportar	Reportar
Monóxido de Carbono	CO	Mg/Nm^3	Reportar	152	152	Reportar
Óxidos de Nitrógeno	NO_x	Mg/Nm^3	201	201	408	Reportar
Partículas Totales Suspendidas	PTS	Mg/Nm^3	NA	213	213	411
Opacidad		%	NA	30	50	50

El Consejo Nacional de Energía (CNE) y actualmente llamado Dirección General de Energía, Hidrocarburos y Minas (DGEHM) según el Decreto 190, tiene la responsabilidad de definir políticas energéticas y establecer estrategias de desarrollo energético a largo plazo compatibles con un modelo de desarrollo económico y social ambientalmente sustentable; en ese sentido la Dirección de Combustibles, identificó la importancia que tiene el uso de las calderas en El Salvador, ya que, en primer lugar, son máquinas que utilizan diferentes tipos de combustibles (diésel, fuel oíl, GLP, kerosene, biomasa, entre otros), y, en segundo lugar, las calderas son dispositivos utilizados por diferentes tipos de industrias, textiles, ingenios azucareros, beneficios de café, teñiría, papelera, lavanderías, generadoras de electricidad, entre otras (Consejo Nacional de Energía, 2014).

Según la Ley General de Prevención de Riesgos en los Lugares Trabajo, el Ministerio de Trabajo y Previsión Social (MTPS) contempla el registro de las calderas a nivel nacional, en ese sentido, a

través de la oficina de Información y Respuesta de la mencionada institución, se tiene el siguiente inventario de las calderas a nivel nacional que se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Calderas por sector, actividad económica y tipo de combustibles en El Salvador (Consejo Nacional de Energía, 2014)

	Diésel	Fuel Oil	Biomasa	GLP	Eléctrico	Cogeneración	Mixto	Biodiesel	Aceite Usado	Vapor	Total
AGRICULTURA	10	14	43								67
Cultivo de café			1								1
Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	10	14	42								66
COMERCIO	17	8		7	9	1					42
Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas	17	8		7	9	1					42
INDUSTRIA	220	237	45	56	50	6	3		1	1	619
Fabricación de cerveza			1								1
Fabricación de pan y galletas	1										1
Industrias manufactureras	219	237	44	56	50	6	3		1	1	617
SERVICIOS	120	42	1	22	18	15	0	1	0	0	219
Actividades artísticas, de entrenamiento y recreativas					1						1
Actividades de alojamiento y de servicio de comidas	12	7		12							31
Actividades de atención a la salud humana y asistencia social	53	17		4	3						77

Actividades de servicios administrativos y de apoyo		1									1
Actividades inmobiliarias			1								1
Administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obligatoria	16	1			9						26
Construcción	1					1					2
Enseñanza	3				3						6
Otras actividades de servicios	27	2		1	2						32
Suministro de agua, evacuación de aguas residuales (alcantarillado); gestión de desechos y actividades de saneamiento	1	1		1							3
Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado	6	10		4		14		1			35
Transporte y almacenamiento	1	3									4
Total	367	301	89	85	77	22	3	1	1	1	947

El desglose de las calderas por sector y actividad económica, como se presenta en la Tabla 2.3, revela varios puntos destacados. En el sector de Agricultura, la segmentación se limita a la actividad de "agricultura, ganadería, silvicultura y pesca", además se identifican empresas dedicadas a la producción y exportación de café, así como criaderos de aves y ganado. Se observa un énfasis en el uso de calderas de biomasa en este sector, especialmente en beneficios de café e ingenios. En el ámbito del comercio, sobresalen las empresas que se dedican a la venta al por mayor, con un enfoque particular en productos lácteos, comercialización de llantas, tubos para vehículos, productos

alimenticios y textiles. En el sector industrial, se resaltan las actividades relacionadas con la manufactura, en particular la producción de ropa, y se destaca el uso de calderas de biomasa en ingenios. En el sector de servicios, se encuentran diversas empresas dedicadas a una amplia gama de actividades, que incluyen arte, alojamiento, salud, asistencia social, servicios administrativos, seguridad pública, construcción, suministro de energía eléctrica y gas, transporte, entre otros. Estos hallazgos proporcionan una visión detallada de cómo se distribuyen y utilizan las calderas en diferentes sectores y actividades económicas, lo que tiene relevancia para la gestión y la toma de decisiones en el ámbito energético y ambiental (Consejo Nacional de Energía, 2014).

Conclusiones Parciales

Investigaciones realizadas en otros países, como la India, han propuesto la implementación de planes de mantenimiento basados en el enfoque de RCM con el objetivo de minimizar el tiempo de inactividad causado por fallos imprevistos. Este enfoque se basa en un análisis exhaustivo de los componentes críticos y sus efectos potenciales, lo que permite una gestión más eficaz de los recursos de mantenimiento y una mayor protección de los intereses económicos, la seguridad, el entorno y la continuidad operativa de la planta. Además de optimizar la confiabilidad y disponibilidad de la caldera, este enfoque también optimiza los recursos al enfocar los esfuerzos de mantenimiento en áreas críticas.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA DEL PLAN DE MANTENIMIENTO RCM

En el desarrollo de este capítulo se expone la metodología RCM a utilizar. La misma se destaca como un enfoque para optimizar programas de mantenimiento y se centra en proponer la implementación de un plan de mantenimiento de calderas, explicando los pasos a seguir, iniciando con la técnica para evaluar la criticidad de los sistemas del área de calderas. También, se destaca la importancia de la recopilación de datos y la colaboración multidisciplinaria. Posteriormente, se detalla desde la recopilación inicial de datos hasta la elaboración del plan de mantenimiento propuesto, utilizando herramientas como el árbol lógico, la distribución de Weibull y el Teorema de Bayes. Por último, se indica que el plan propuesto y actual, se debe de comparar su confiabilidad y realizar un análisis de costo para ofrecer una visión integral de la efectividad de RCM en el contexto específico de calderas.

3.1. Características principales de la metodología RCM.

El análisis RCM es un enfoque de evaluación sistemática para desarrollar u optimizar un programa de mantenimiento. RCM utiliza un árbol lógico de decisión para identificar los requisitos de mantenimiento de los equipos de acuerdo con las consecuencias operativas y de seguridad de cada falla y el mecanismo de degradación responsable de las fallas (Chen & Zhang, 2012). El proceso RCM implica:

- Selección del sistema y recopilación de datos.
- Definición de límites del sistema
- Análisis de fallas funcionales
- Análisis de modo y efecto de falla (FMEA, *Failure Mode and Effect Analysis*)
- Análisis de criticidad
- Selección de tareas de mantenimiento mediante análisis de árbol lógico (Chen & Zhang, 2012).

3.2. Implementación de la metodología RCM.

Se inicia seleccionando el sistema realizando el análisis de criticidad con la técnica de proceso de análisis jerárquico (AHP, *Analytical Hierarchy Process*) de los sistemas que componen el área de calderas. Este método evalúa la toma de decisiones multicriterio y se utiliza en problemas en los cuales es necesario evaluar aspectos tanto cualitativos como cuantitativos. Jagtap y Bewoor utilizaron el proceso AHP para priorizar los equipos de las centrales térmicas (Jagtap & Bewoor, 2017). La técnica AHP ayuda a organizar los aspectos críticos de un problema en una estructura jerárquica similar a la estructura de un árbol familiar, reduciendo las decisiones complejas a una serie de comparaciones que permiten la jerarquización de los diferentes aspectos evaluados con una matriz

de juicios, y un vector de prioridad calculado y usado para comparar los elementos dentro de una matriz (Saaty, 1990) (Alrifaeey et al., 2020) (Kiran, 2021).

Antes de iniciar el análisis de la metodología de RCM, es imprescindible recopilar la información necesaria de los activos que ayudará como insumo. Esta información abarca planos, diagramas, manuales, bitácoras de operación/mantenimiento y otros documentos relevantes, como el contexto operativo (si está disponible). Además, se llevan a cabo encuestas al personal de operación, producción y mantenimiento, así como entrevistas a expertos en calderas, con el fin de obtener información sobre los requerimientos de desempeño deseados y los problemas actuales que puedan estar surgiendo. Esta recopilación de datos es esencial para asegurar un análisis efectivo del proceso de RCM y seguir las 7 preguntas básicas para la implementación de RCM (Moubray, J., 2004), las cuales son:

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de funcionamiento en la ubicación operativa?
2. ¿Cómo se puede dejar de cumplir las funciones?
3. ¿Qué puede originar cada fallo funcional?
4. ¿Qué efectos provocan los fallos?
5. ¿Qué consecuencias provocan los fallos?
6. ¿Qué valoración tienen los fallos?
7. ¿Qué actividades se pueden realizar para prevenir o evitar que aparezcan los fallos?

La primera pregunta ¿Cuáles son las funciones y estándares de funcionamiento en la ubicación operativa?; busca identificar las funciones primarias y secundarias del activo bajo estudio, enfocándose en su utilidad. Es esencial desglosar estas funciones, incluso las aparentemente menos importantes, para comprender su importancia en diferentes contextos. La segunda pregunta ¿Cómo se puede dejar de cumplir las funciones?; se centra en cómo el activo puede dejar de cumplir sus funciones. Cualquier desviación operativa se considera un fallo funcional. La tercera pregunta ¿Qué puede originar cada fallo funcional?; implica identificar las causas más probables de cada fallo funcional. Esto puede ser un proceso técnico complejo que requiere la colaboración de expertos en diversas disciplinas. Es esencial analizar a fondo para comprender las causas fundamentales, ya que esto influirá en los métodos de mantenimiento proactivo recomendados. La cuarta pregunta ¿Qué efectos provocan los fallos?; se centra en los efectos de los fallos, considerando evidencias, amenazas a la seguridad, impacto en la producción, daños físicos y dificultades de reparación. Esta información es vital para la gestión de consecuencias de fallos. La quinta pregunta ¿Qué consecuencias provocan los fallos?; aborda las consecuencias de los fallos, que van más allá de la prevención y se enfocan en la eliminación o reducción de impactos negativos. Posteriormente, en el proceso del RCM, se aborda la respuesta a la sexta pregunta ¿Qué valoración tienen los fallos?; que implica la evaluación de cada

posible fallo. La séptima pregunta 7. ¿Qué actividades se pueden realizar para prevenir o evitar que aparezcan los fallos?; se contesta asignando las tareas de mantenimiento a los modos de fallo usando el diagrama de decisión lógico RCM.

En la práctica, el personal de mantenimiento no puede abordar todas estas preguntas por sí solo, ya que muchas de las respuestas requieren la aportación de personal de operaciones o producción. Esto es especialmente relevante en el caso de preguntas relacionadas con funciones, desempeño deseado, efectos y consecuencias de las fallas. Por esta razón, es importante llevar a cabo una revisión de los requisitos de mantenimiento, y esto debe realizarse mediante la colaboración de grupos pequeños, que incluyan al menos a una persona responsable de mantenimiento y a alguien de la función operativa. La categoría de los miembros del grupo es menos importante que el conocimiento real que posean sobre el funcionamiento del equipo. Cada miembro del grupo debe haber recibido capacitación en RCM. La Figura 3.1 ilustra la organización típica de un grupo multidisciplinario para la implementación del RCM.



Figura 3.1 Grupo típico multidisciplinario para la implementación del RCM (Moubray, J., 2004).

El siguiente paso consistirá en identificar los equipos o componentes que pertenecen al sistema y delimitar las condiciones de contorno según la Norma ISO 14224:2016, que brinda una sólida base para la recolección y organización de los datos de confiabilidad y mantenimiento para los activos instalados en las industrias (ISO, 2016). Debido a que la norma aborda equipos comunes en las instalaciones industriales, esta norma puede ser adaptada para su aplicación en cualquier industria que tenga activos físicos en los procesos. De esta forma se puede utilizar esta norma al recopilar la información del activo (Campos-López, O., Tolentino-Eslava, G., Toledo-Velázquez, M., &

Tolentino-Eslava, R, 2019). En la Figura 3.2 se muestra la taxonomía descrita por la norma, la cual consta de una pirámide con distintos niveles que abarcan desde lo más general (primer nivel), a lo más específico (noveno nivel). Los niveles del 1 al 5 están relacionados con el uso y la ubicación del activo, mientras que los niveles del 6 al 9 se refieren a la subdivisión del activo.

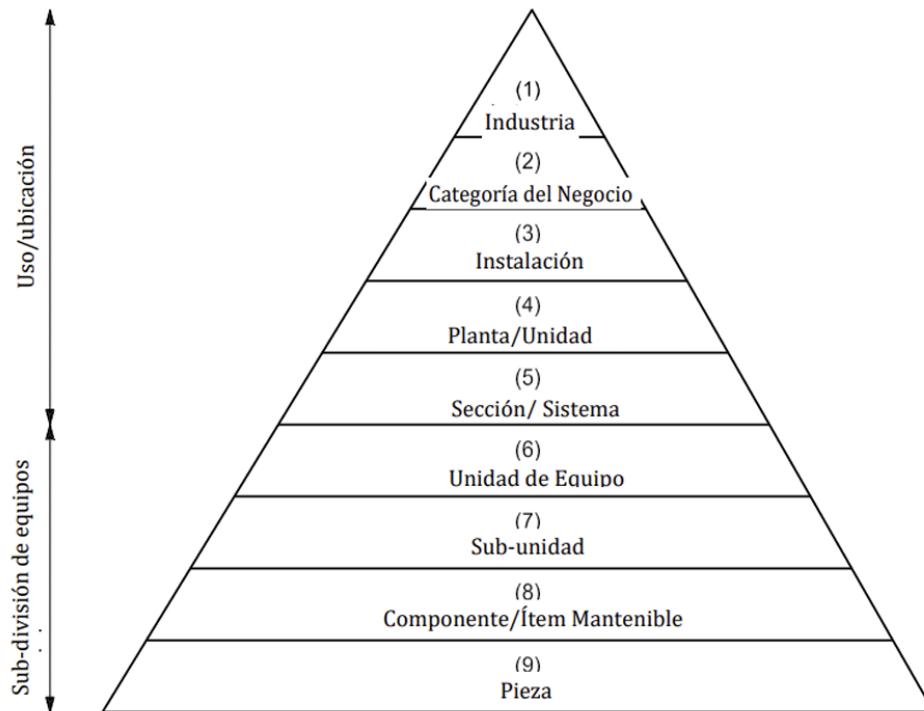


Figura 3.2 Taxonomía según estándar ISO 14.224 (ISO, 2016) .

Luego se lleva a cabo los cálculos necesarios para desarrollar un plan de mantenimiento para la caldera pirotubular, enfocado en RCM. Para ello, se definen los parámetros actuales de operación del sistema en la empresa textil en El Salvador, los cuales sirven como datos de entrada para realizar los cálculos de las variables involucradas. De esta forma, se obtiene un contexto operacional completo del sistema (Gardella González, 2011). Con base en estas condiciones, se procede con el Análisis Funcional, Modo de fallo, Efecto de fallos y Consecuencia de fallos (Impacto de seguridad e higiene, medio ambiente, producción y costos de mantenimiento) para cada subsistema (Gardella González, 2011). Para esto, se consideran datos históricos y registros operativos de la caldera, y se aplican criterios de evaluación basados en los índices de Gravedad, Frecuencia de fallos y Detectabilidad para cálculo de ponderación de riesgo ($NPR = G \times F \times D$) (Moubray, J., 2004).

Las tareas de mantenimiento se asignan de manera lógica. Se hace tomando el diagrama lógico de decisión del enfoque RCM, siendo relevante para mejorar la confiabilidad y disponibilidad de sistemas y equipos en el campo de estudio. Su aplicación práctica puede traducirse en beneficios

tangibles, optimizar el mantenimiento de activos, reducir costos y mejorar el rendimiento operativo. En la Figura 3.3 se muestra el diagrama lógico de decisión de tareas de mantenimiento.

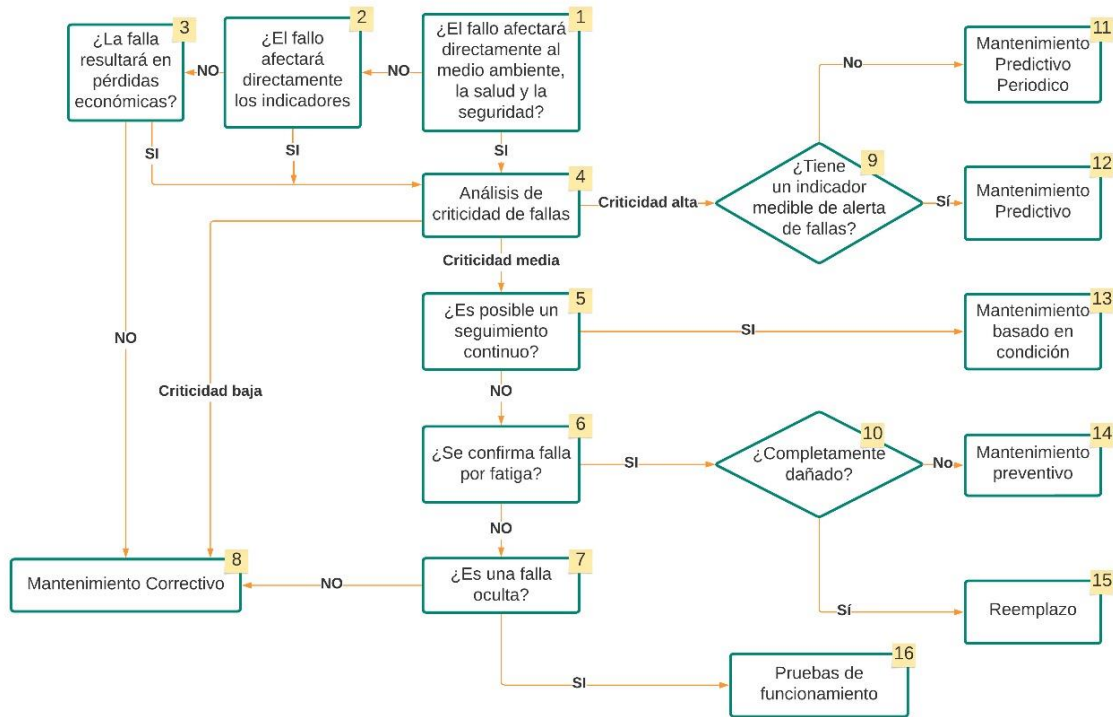


Figura 3.3 Marco de decisión RCM modificado (Patil et al., 2022).

Posteriormente, se establece los intervalos de mantenimiento óptimos basados en el número de ponderación de riesgo previamente calculado. Estos intervalos se agrupan según el tipo de mantenimiento (frecuencia de aplicación). Para realizar estos cálculos, se utiliza la distribución de Weibull (Olazo Quispe, 2017). La distribución Weibull es una distribución de probabilidad muy utilizada para modelar tiempos de falla dada su interpretación y su flexibilidad de ajuste empírico. Esta distribución permite visualizar tiempos desde la primera y segunda falla en un equipo (Jaramillo et al., 2008).

Se calcula el Tiempo Medio hasta la Falla (MTTF, *Mean Time to Failure*) en horas mediante la actualización de la distribución de la frecuencia de fallas, empleando el Teorema de Bayes. Este método permite combinar información con datos de OREDA (*Onshore Reliability Data*) (Oreda, 2002) mejorando la precisión de las estimaciones de la frecuencia de fallas. Luego se evalúa la confiabilidad del plan de mantenimiento propuesto con respecto al actual y por último la evaluación del plan y su análisis de costos. En la Figura 3.4 se muestra el flujograma de la metodología a seguir de acuerdo con el modelo de RCM.

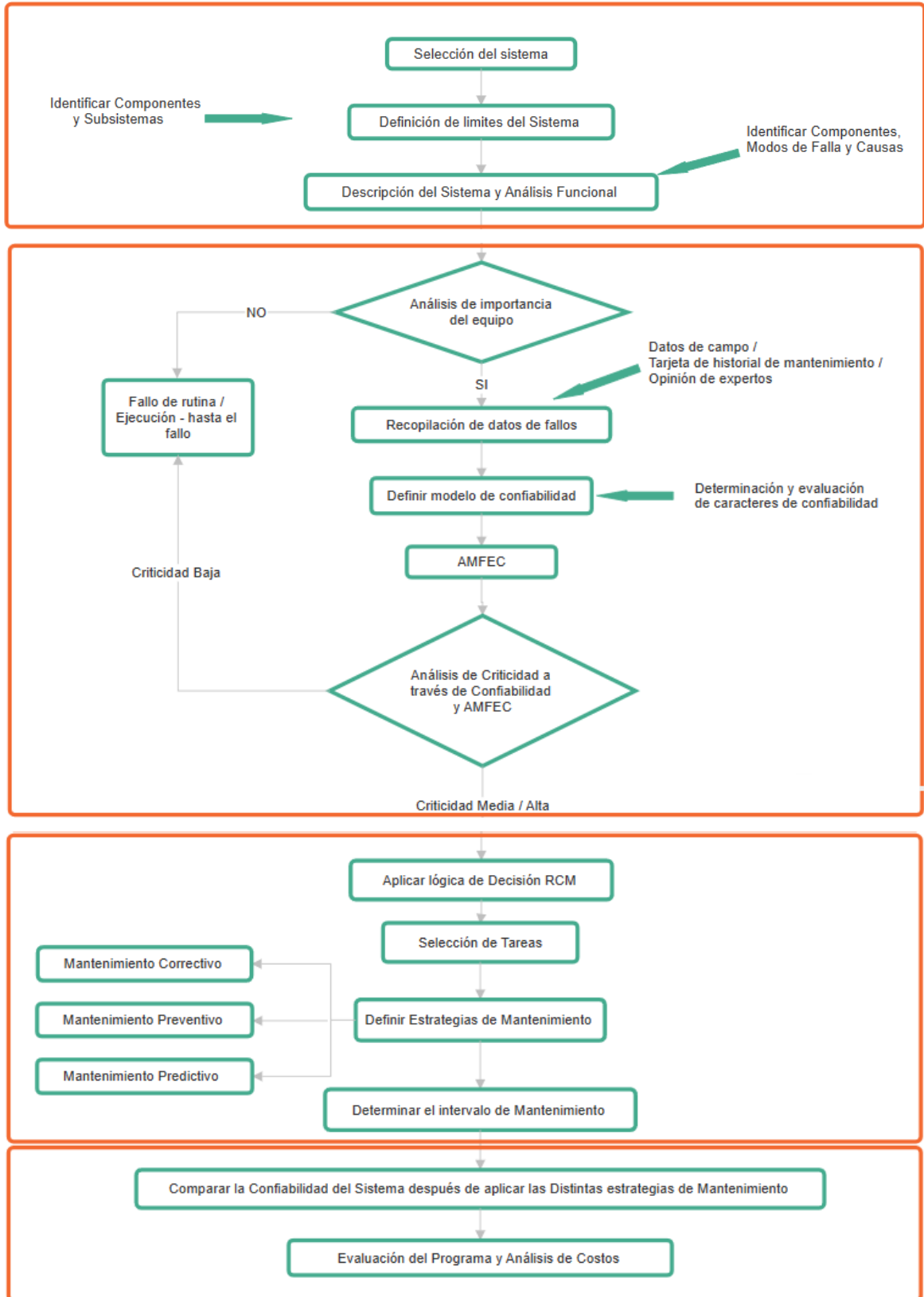


Figura 3.4 Modelo de RCM del artículo Development of Optimized Maintenance Program for a Steam Boiler System Using Reliability-Centered Maintenance Approach (Patil et al., 2022).

Conclusiones Parciales

El análisis RCM es un enfoque esencial para el desarrollo y optimización de programas de mantenimiento, destacando su aplicación sistemática en siete preguntas fundamentales. Este proceso, que abarca desde el análisis de criticidad hasta la selección de tareas mediante un árbol lógico, requiere una colaboración multidisciplinaria entre personal de mantenimiento, operaciones y producción. La recopilación exhaustiva de información, respaldada por normativas como la ISO 14224:2016, es fundamental antes de aplicar el RCM. La metodología incluye el uso de herramientas como el FMEA y AHP. La aplicabilidad práctica se refleja en un diagrama lógico de decisión modificado y un flujograma que ilustra la metodología completa de RCM, destacando su capacidad para mejorar la confiabilidad y disponibilidad de sistemas y equipos, reducir costos y potenciar el rendimiento operativo.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desarrollo de este capítulo se inicia con un análisis de criticidad, que demuestra la relevancia de las calderas dentro del proceso productivo del área de calderas. Posteriormente, se utiliza la norma ISO 14224:2006, para disgregar la caldera en subsistemas, y cada componente se expone detalladamente. Después, se elabora un análisis de modos y efectos de fallas por cada subsistema, calculando números de prioridad de riesgo de cada componente. Seguidamente, se elaboran las tablas de información y decisión RCM para los componentes de mayor relevancia dentro de los subsistemas de la caldera pitotubular para generar el plan de mantenimiento. Finalmente, se evalúa la confiabilidad del plan de mantenimiento propuesto y la viabilidad económica.

4.1. Análisis de criticidad AHP

El análisis de criticidad es una herramienta que permite jerarquizar sistemas y eventualmente seleccionar aquellos que se deseen priorizar. Una buena ponderación de criticidad dependerá mucho de cuánto se conoce de los equipos y los procesos productivos de la planta industrial. El uso de la técnica AHP con el propósito de priorizar sistemas y optimizar el proceso de toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento de estos sistemas, es esencial para tomar decisiones que permitan asignar de manera eficiente los recursos financieros, humanos y tecnológicos, a fin de desarrollar planes de mantenimiento efectivos. Esto requiere considerar el nivel de criticidad de los distintos sistemas y equipos que desempeñan un papel fundamental en el proceso de producción. La jerarquización de los sistemas y equipos no es una tarea sencilla, ya que involucra una amplia gama de factores que generan incertidumbre en el proceso. Por esta razón, la aplicación de la técnica AHP resulta fundamental, ya que contribuye a identificar de manera específica el nivel de criticidad de los sistemas y equipos (Alrifay et al., 2020; Saaty, 1990). Esto, a su vez, permite optimizar la asignación de los recursos de mantenimiento de acuerdo con la importancia, es decir, la criticidad que cada sistema o equipo tiene en el proceso de producción. El método generará un listado en función de los factores básicos de riesgo a ser evaluados: frecuencia de fallos (FF), niveles de detección de falla (DF), niveles de severidad de fallas (SF) y costes de los fallos (CF) dentro del contexto operacional (Alrifay et al., 2020; Saaty, 1990). En la Tabla 4.1 se indica los sistemas a jerarquizar.

Tabla 4.1 Listado de sistemas dentro del área de calderas a jerarquizar (Elaboración Propia).

Ítem	Descripción	Código
1	Caldera 1	C1
2	Caldera 2	C2
3	Bomba de alimentación de agua condensada de caldera 1	MBC1
4	Bomba de alimentación de agua condensada de caldera 2	MBC2
5	Bomba de dosificado de químicos de caldera 1	MBDQ1

6	Bomba de dosificado de químicos de caldera 2	MBDQ2
7	Tanque de condensado	TQC
8	Motor bomba de agua dura 1	MBAD1
9	Motor bomba de agua dura 2	MBAD2
10	Motor bomba de agua suave 1	MBAS1
11	Motor bomba de agua suave 2	MBAS2
12	Variador de motor bomba de agua suave 1	VAR1
13	Variador de motor bomba de agua suave 2	VAR2
14	Suavizador de agua	SUA
15	Motor bomba de retorno de agua caliente	MBAC
16	Variador de motor bomba de retorno de agua caliente	VARAC

Antes de iniciar el análisis de criticidad se explica el proceso de generación de vapor en la empresa textil objeto de estudio (Figura 4.1). El proceso comienza con la extracción de agua dura de los pozos 1 y 2, que se almacena en la cisterna de agua dura. Una vez que está en funcionamiento, el agua dura pasa por un proceso de ablandamiento a través del sistema del suavizador de agua para reducir los cationes de calcio y magnesio, evitando así la incrustación en la caldera. Estos iones son reemplazados por sodio, lo que da lugar a sales más solubles. Se prepara una mezcla homogénea de salmuera (agua con sal) y se mide la concentración de salmuera con un hidrómetro, la cual debe estar en el rango del 80% al 100%. Cuando el nivel de la cisterna de agua suave disminuye, se envía una señal al suavizador para que inicie el proceso de regeneración, que generalmente tiene una duración de dos horas. A continuación, se verifica la dureza del agua en la cisterna de agua suave mediante un kit de reactivos químicos para analizar la dureza, y el valor debe estar en el rango de 0 a 3 ppm. Una vez que el suavizador ha completado el proceso de regeneración, la cisterna se llena y el agua suave se bombea al tanque de condensado. Antes de encender la caldera, se verifica lo siguiente: nivel de agua en la caldera, el nivel de agua en el tanque de condensado, la presión de la alimentación de gas, así como la presión y la temperatura de la caldera. Se procede a energizar el panel de control de la caldera y, a continuación, se enciende la caldera de manera manual a través del controlador. Por razones de seguridad, la caldera realiza automáticamente un proceso de purga de los gases de combustión que puedan estar acumulados en su interior. Tras la purga de los gases de combustión, el quemador regula el suministro de gas y aire para establecer una llama baja, permitiendo que la presión y la temperatura aumenten gradualmente hasta alcanzar los 70 psi. Una vez que se alcanza esta presión, se cambia el modo de funcionamiento de manual a automático para permitir que la llama se ajuste a alta intensidad, continuando el aumento de la presión hasta alcanzar 115 psi y los 400 °F. Cuando la caldera alcanza la presión de 115 psi, se abre gradualmente la válvula de compuerta del manifold principal de vapor, permitiendo que el vapor se distribuya hacia las máquinas de teñido, secado y la lavadora.

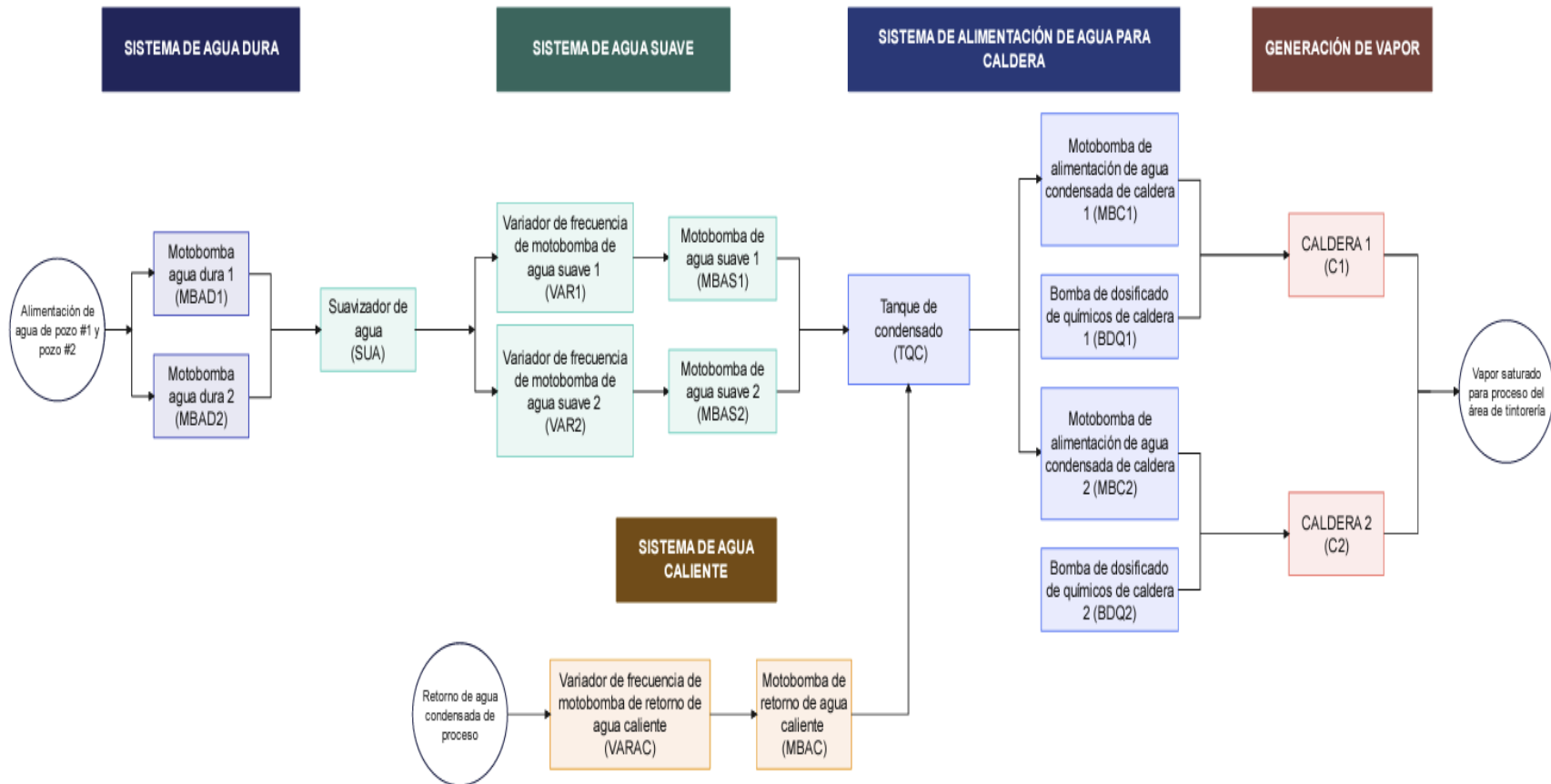


Figura 4.1 Diagrama del funcionamiento del área de calderas con los diferentes sistemas involucrados (Elaboración Propia).

El vapor, después de ser utilizado por las máquinas del área de tintorería, regresa en forma de condensado de agua al tanque de agua caliente, a una temperatura de aproximadamente 90°C, y luego es bombeado hacia las máquinas que requieren agua caliente para el proceso de teñido y hacia el tanque de condensado. En la tubería de alimentación de agua se encuentra una bomba que dosifica una mezcla homogénea de productos químicos, incluyendo antiincrustantes, anticorrosivos y secuestrantes, con el fin de tratar el agua dentro de la caldera, previniendo así la corrosión de los tubos, formación de incrustaciones y manteniendo el pH del agua entre 8.5 y 10 para evitar la fragilidad cáustica y la posibilidad de que los tubos se agrieten.

Como se observa en la Figura 4.1, el diagrama de bloques de funcionamiento muestra que el área de las calderas consta de dos unidades. Teóricamente, esta duplicación busca proporcionar redundancia en el contexto operativo del proceso. Sin embargo, en la práctica, esta duplicación suele estar en modo de espera (standby). Sin embargo, esta configuración presenta importantes desafíos. Uno de ellos es el tiempo de conmutación, que no debe considerarse una falla funcional en sí; pero es un aspecto crítico. Otro desafío radica en que, en lugar de mejorar la confiabilidad, esta configuración se centra en la mejora de la disponibilidad de las calderas al reducir los tiempos de reparación funcional; pero no aborda la prevención del efecto de la falla en sí.

Un inconveniente adicional en esta configuración se relaciona con la presencia de fallas ocultas, las cuales se abordan mediante conmutaciones preventivas. Asimismo, se identifica otro problema significativo: las conmutaciones no se llevan a cabo con el propósito de realizar pruebas, sino que se ejecutan de manera equitativa en ambas unidades. Esta forma de uso plantea desafíos en términos de la confiabilidad del sistema, ya que su implementación con lleva una pérdida inherente de confiabilidad. Existe la posibilidad de que una de las calderas falle mientras la otra se encuentra en proceso de reparación, generando un riesgo potencial para la integridad del sistema. Dada que las calderas son idénticas, así como de los componentes involucrados en su operación, se considera suficiente realizar un análisis de criticidad en una de las líneas. El objetivo es replicar integralmente este análisis en la otra línea de manera idéntica.

En el proceso de análisis jerárquico, se inicia por la definición de los criterios de decisión en forma de objetivos jerárquicos. En este contexto, el objetivo principal del estudio se centra en identificar el sistema de mayor impacto en el área de calderas. Esta jerarquía se estructura en varios niveles, comenzando en el nivel más alto con la formulación del objetivo principal del proceso de jerarquización. Posteriormente, se establecen niveles intermedios que incluyen criterios y subcriterios específicos que serán evaluados en el análisis. Finalmente, en el nivel más bajo de la jerarquía, se describen las alternativas que serán objeto de comparación (Saaty, 1990).

En la Figura 4.2 se presenta el esquema general del modelo AHP desarrollado para la jerarquización.

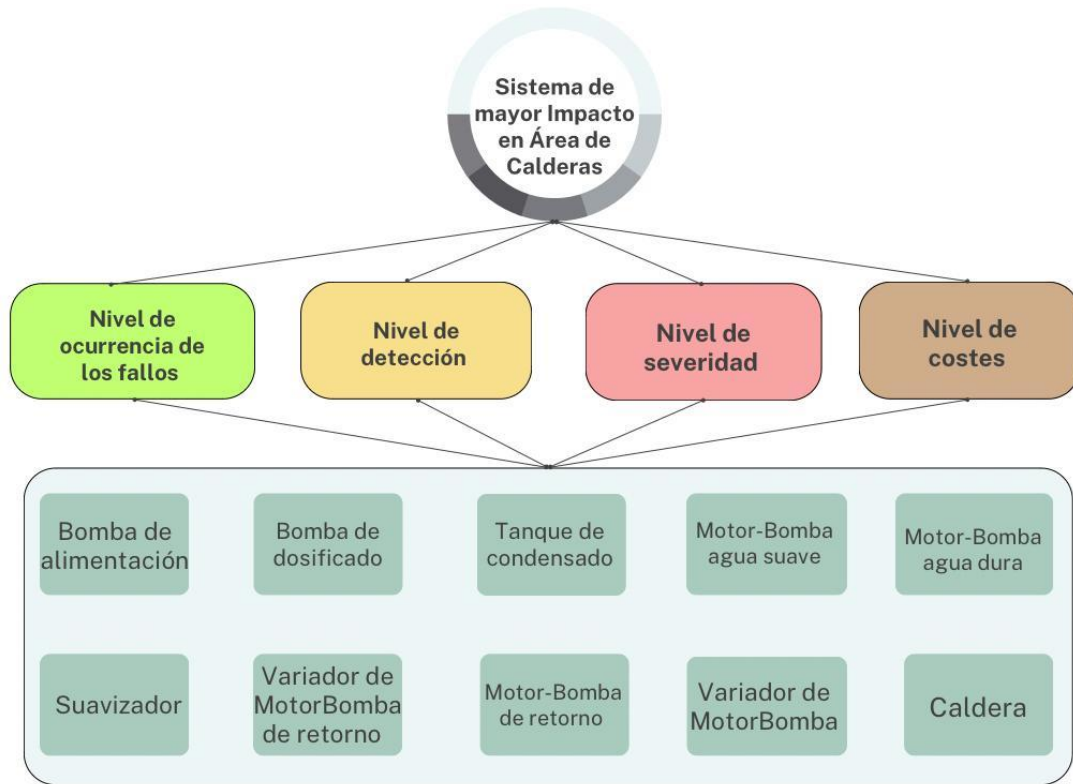


Figura 4.2 Modelo AHP diseñado para jerarquizar los sistemas de la Área de Calderas en la empresa textil (Elaboración Propia).

La evaluación, o ponderación, de los diversos criterios, subcriterios y alternativas se lleva a cabo teniendo en cuenta su importancia relativa en cada nivel. Tanto criterios cualitativos como cuantitativos pueden ser comparados mediante juicios informales para determinar los pesos y las prioridades. En el caso de criterios cualitativos, la técnica AHP emplea comparaciones simples (apareadas) para establecer los pesos y evaluarlos. De esta manera, se concentra en la comparación de solo dos criterios a la vez, lo que se fundamenta en la suposición de que resulta más sencillo elegir una relación de comparación que asignar un valor absoluto. Estos juicios verbales se traducen a una escala de puntuación, que se describe en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Valoración de los Juicios de Expertos (Saaty, 1990).

Juicios	Score
Igual	1
Moderado	3
Fuerte	5
Muy fuerte	7
Extremo	9

A continuación, en una matriz de juicios, se calcula un vector de prioridad que se utiliza para ponderar y comparar los elementos de la matriz (Saaty, 1990).

La actividad de comparación apareada se realizó en una reunión de visita técnica a la empresa textil en la cual participó el personal de la planta. Los resultados obtenidos en la comparación apareada realizada para los cuatro criterios considerados en el proceso de jerarquización de los sistemas del área de calderas se muestran en la Tabla 4.3. Las celdas de color amarillo son los valores de la matriz triangular superior; la diagonal es siempre 1 y la matriz triangular inferior se llena usando la Ecuación 4.1 (Teknomo, 2012).

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Tabla 4.3 Matriz de comparación apareada de los criterios de jerarquización (Elaboración Propia).

Criterios	Frecuencia de Fallos	Detección de Fallos	Severidad de Fallos	Costos de Fallos
Frecuencia de Fallos	1	3	1/2	1
Detección de Fallos	1/3	1	1/3	1
Severidad de Fallos	2	3	1	1
Costos de Fallos	1	1	1	1

Se definió un proceso basado en el análisis de una serie de factores ponderados que permiten cuantificar cada criterio por cada alternativa a jerarquizar. De forma particular, cada criterio es dividido en varias clases a las cuales se les asigna diferentes niveles de criticidad (intervalo del 1 al 10). Las puntuaciones para cada criterio se asignaron de forma cuantitativa en reunión con el personal de la planta.

El Criterio FF es evaluado en función del número de fallos por período de tiempo. En la Tabla 4.4 se presentan los diferentes niveles de frecuencia de fallos disponibles.

Tabla 4.4 Escala que permite definir el criterio de frecuencia de fallos (FF) (Parra & Crespo Marquez, 2019).

FF	Nivel de frecuencia de ocurrencia fallos	Definición del nivel de Frecuencia de ocurrencia de fallos
10	Muy alta: fallo que es casi inevitable	Una ocurrencia por semana
9		Una ocurrencia por mes
8	Alta: continuamente	Una ocurrencia cada tres meses
7		Una ocurrencia cada seis meses
6	Moderada: ocasionalmente	Una ocurrencia cada nueve meses
5		Una ocurrencia al año
4	Baja: fallo ocurre muy poco	Una ocurrencia entre dos y tres años
3		Una ocurrencia entre cuatro y seis años

2		Una ocurrencia entre siete y nueve años
1	Remota: no es probable que ocurra el fallo	Una ocurrencia en más de 10 años

El Criterio DF está relacionado con los sistemas de protección, control y alerta disponibles para detectar de forma segura la ocurrencia de los eventos de fallos. Para la definición del nivel de detección de fallos de cada alternativa (sistema) a ser evaluado se revisó todos aquellos aspectos de instrumentación, control y protección existentes en cada uno de los sistemas a ser evaluados.

En la Tabla 4.5 se presentan los diferentes niveles de detección de fallos disponibles.

Tabla 4.5 Escala que permite definir el criterio de Detección de fallos (DF) (Parra & Crespo Marquez, 2019).

DF	Nivel de Detección (grado de control de fallos)	Definición del nivel de Detección de fallos
10	Absolutamente incierto	El sistema no es controlado o inspeccionado, las anomalías por fallos no son detectados
7	Bajo	Sólo se inspecciona el sistema de forma visual durante todo el proceso (no hay ayuda de equipos modernos de control)
5	Moderado	El sistema se controla bajo técnicas estadísticas de control de fallos, y el producto es inspeccionado al final del proceso en la línea de producción (25 % automatización)
3	Alto	El sistema se controla bajo técnicas estadísticas de control de fallos, y el producto es inspeccionado en más de dos puntos del proceso en la línea de Producción <75 % automatización
2	Muy alto	El sistema se controla bajo técnicas estadísticas de control de fallos, y el producto es inspeccionado durante todo el proceso en la línea de producción 100 % automatización)
1	Totalmente controlado	El sistema se controla bajo técnicas estadísticas de control de fallos, y el producto es inspeccionado durante todo el proceso de la línea de producción (100 % automatización con calibración continua y preventivo de los equipos utilizados para controlar e inspeccionar el estado operacional del sistema

El Criterio SF está relacionado con el impacto de los fallos sobre la seguridad, el ambiente y las operaciones. Para la definición del criterio de severidad de fallos, es necesario conocer cuáles son los efectos que pueden traer consigo los fallos una vez que estos ocurren dentro de un contexto operacional específico. En la Tabla 4.6 se presentan los diferentes niveles de severidad de fallos disponibles.

Tabla 4.6 Escala que permite definir el criterio de severidad de fallos (SF) (Parra & Crespo Marquez, 2019).

SF	Nivel de Severidad de fallos	Definición del nivel de severidad de la falla
10	Peligrosamente alto	Fallos que pueden causar pérdidas humanas
9		Fallos que pueden crear complicaciones con regulaciones federales (leyes)
8		Fallos que hacen inoperables los equipos y provocan la pérdida de función para la que fueron diseñados.
7	Alto	Fallos que causan un alto grado de insatisfacción al cliente que recibe el servicio
6		Fallos que afectan un subsistema y originan un mal funcionamiento de los equipos disminuyendo la calidad del servicio
5	Bajo	Fallos que provocan la pérdida de eficiencia y causan que el cliente se queje
4		Fallos que pueden ser mejoradas con pequeñas modificaciones y su impacto sobre la eficiencia de los equipos es pequeña
3	Menor	Fallos que podrían crear mínimas molestias al cliente, molestias que el mismo cliente podría corregir en el proceso sin necesidad de perder eficiencia
2		Fallos que son difíciles de reconocer por el cliente y cuyos efectos serán insignificantes para el proceso
1	Ninguno	Fallos que no son identificables por el cliente y no afectan la eficiencia del proceso

El Criterio CF está relacionado con las posibles consecuencias económicas de los fallos sobre la seguridad, el ambiente y las operaciones. Para la definición del criterio de severidad de fallos, es necesario estimar cuales son los costes que pueden traer consigo los fallos una vez que estos ocurren dentro de un contexto operacional específico. En la Tabla 4.7 se presentan los diferentes niveles de severidad de fallos disponibles.

Tabla 4.7 Escala que permite definir el criterio de costes de fallos (CF) (Parra & Crespo Marquez, 2019).

CF	Nivel de Costes de fallos	Definición del nivel de costes de los fallos.
10	Peligrosamente alto	Fallos que provocan altos costes por aspectos de seguridad y ambiente (indemnizaciones)
8	Muy alto	Fallos que provocan altos costes por pérdida total de producción
6	Alto	Fallos que generan altos costes por reparaciones correctivas
4	Moderado	Fallos que generan costes significativos de producción vía reparación

1	Muy bajos	Fallos que generan costes insignificantes - no afectan el proceso de producción
---	-----------	---

En la Tabla 4.8 se muestran los resultados de la evaluación de las alternativas (sistemas) para cada uno de los criterios seleccionados.

Tabla 4.8 Evaluación de los sistemas para cada uno de los criterios seleccionados (Elaboración Propia).

Sistemas	FF	Jerarquizació	DF	Jerarquización	SF	Jerarquizació	CF	Jerarquizació
		n local FF = (FF/Total)		local DF = (DF/Total)		n local SF = (SF/Total)		n local CF = (CF/Total)
Caldera	8	0.142857143	5	0.080645161	10	0.15625	10	0.212765957
Bomba de alimentación de agua condensada de caldera	5	0.089285714	7	0.112903226	6	0.09375	6	0.127659574
Bomba de dosificado de químicos de caldera	7	0.125	7	0.112903226	6	0.09375	4	0.085106383
Tanque de condensado	3	0.053571429	7	0.112903226	6	0.09375	1	0.021276596
Motor bomba de agua dura	7	0.125	7	0.112903226	6	0.09375	4	0.085106383
Motor bomba de agua suave	7	0.125	7	0.112903226	6	0.09375	4	0.085106383
Variador de motor bomba de agua suave	4	0.071428571	5	0.080645161	6	0.09375	4	0.085106383
Suavizador de agua	7	0.125	7	0.112903226	6	0.09375	6	0.127659574
Motor bomba de retorno de agua caliente	4	0.071428571	5	0.080645161	6	0.09375	4	0.085106383
Variador de motor bomba de retorno de agua caliente	4	0.071428571	5	0.080645161	6	0.09375	4	0.085106383
Total	56		62		64		47	

Se calculó la estimación del radio de inconsistencia (IR, *radius of inconsistency*) y la priorización de los criterios. Antes de determinar una inconsistencia, es necesario estimar el índice de consistencia (CI, *consistency index*) de una matriz n x n de juicios, donde CI viene definido en la Ecuación 4.2.

$$CI = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Dónde $\lambda_{\text{máx}}$ es el máximo autovalor de la matriz. De esta forma IR es definido por la Ecuación 4.3.

$$IR = \frac{CI}{R} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

Los juicios pueden ser considerados aceptables si $IR \leq 0.1$; en casos de inconsistencia, el proceso de evaluación para la matriz evaluada es inmediatamente repetido. Valores superiores a 0.1 justifican una mayor investigación de los criterios evaluados. R es el valor aleatorio promedio de CI para una matriz n x n. Los valores de R son mostrados en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Valores de R para matrices de diferentes órdenes (Teknomo, 2012)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

El vector de prioridad se obtiene del vector propio normalizado de la matriz, este valor se divide por cada elemento de la matriz con la suma de su columna, para normalizar el peso relativo, siendo el vector propio principal normalizado el promedio de las filas. La suma de cada columna debe ser siempre 1, como se muestra en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Matriz Normalizada (Elaboración Propia).

					Vector propio principal normalizado	
		0.23	0.38	0.18	0.25	0.26
Matriz	0.08	0.13	0.12	0.25	0.14	
normalizada	0.46	0.38	0.35	0.25	0.36	
	0.23	0.13	0.35	0.25	0.24	
Σ	1.00	1.00	1.00	1.00		

El valor propio principal $\lambda_{\text{máx}}$, se obtiene de la suma de productos entre cada elemento del vector propio principal normalizado y el recíproco del vector diagonal de la matriz normalizada marcados en rojo.

$$\lambda_{\text{máx}} = (0.26)(4.35) + (0.14)(7.69) + (0.36)(2.85) + (4)(0.24) = 4.232$$

Usando la Ecuación 4.2 se obtiene

$$CI = \frac{4.232 - 4}{4 - 1} = 0.077$$

Usando la Ecuación 4.3 se obtiene

$$IR = \frac{0.077}{0.90} = 0.086$$

El valor de IR resultante es de 0.086, dando menor a 0.1, siendo este valor aceptable para la jerarquización de criterios. En la Tabla 4.11. se muestra la estimación del IR y la jerarquización por criterio.

Tabla 4.11 Estimación del IR y jerarquización de los criterios evaluados (Elaboración Propia).

Criterios	Frecuencia de Fallos	Detección de Fallos	Severidad de Fallos	Costos de Fallos	Jerarquización por criterio
Frecuencia de Fallos	1	3	1/2	1	0.26
Detección de Fallos	1/3	1	1/3	1	0.14
Severidad de Fallos	2	3	1	1	0.36
Costos de Fallos	1	1	1	1	0.24
Radio de inconsistencia (IR) =	0.086				

Se procede a cuantificar para cada uno de los sistemas evaluados para obtener la jerarquización final en función de la valoración realizada de cada uno de los criterios. A continuación, se presentan los resultados de la jerarquización en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Jerarquización Final de la Evaluación de los equipos en el Área de Calderas (Elaboración Propia).

Sistemas	Jerarquización local x Total Criterio FF (1)	Jerarquización local x Total Criterio DF (2)	Jerarquización local x Total Criterio SF (3)	Jerarquización local x Total Criterio CF (4)	Jerarquización final = (1) + (2) + (3) + (4)
Caldera	0.037	0.011	0.056	0.051	0.156
Bomba de alimentación de agua condensada de caldera	0.023	0.016	0.034	0.031	0.103
Bomba de dosificado de químicos de caldera	0.032	0.016	0.034	0.020	0.102
Tanque de condensado	0.014	0.016	0.034	0.005	0.069

Motor bomba de agua dura	0.032	0.016	0.034	0.020	0.102
Motor bomba de agua suave	0.032	0.016	0.034	0.020	0.102
Variador de motor bomba de agua suave	0.018	0.011	0.034	0.020	0.084
Suavizador de agua	0.032	0.016	0.034	0.031	0.113
Motor bomba de retorno de agua caliente	0.018	0.011	0.034	0.020	0.084
Variador de motor bomba de retorno de agua caliente	0.018	0.011	0.034	0.020	0.084

Posteriormente, los resultados se ordenan por nivel de importancia (ranking) de mayor a menor y el ranking final de análisis de criticidad obtenido se muestra en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Ranking Final del Análisis de Criticidad (Elaboración Propia).

Sistemas	Jerarquización final	Ranking
Caldera	0.156	1
Suavizador de agua	0.113	2
Bomba de alimentación de agua condensada de caldera	0.103	3
Bomba de dosificado de químicos de caldera	0.102	4
Motor bomba de agua dura	0.102	5
Motor bomba de agua suave	0.102	6
Variador de motor bomba de agua suave	0.084	7
Motor bomba de retorno de agua caliente	0.084	8
Variador de motor bomba de retorno de agua caliente	0.084	9
Tanque de condensado	0.069	10

Según los resultados del análisis de criticidad, se identificó que la caldera pirotubular es el componente más crítico, representando un índice de 15.6 % de los sistemas involucrados. Debido a la similitud entre ambas calderas pirotubulares, se opta por analizar los modos de fallo y costos únicamente a una caldera. La importancia de estos equipos es innegable, dado que las calderas son sistemas fundamentales que abastecen a todas las líneas de producción, lo que significa que su eventual paro ocasionaría una interrupción generalizada en toda la planta.

4.2. Parámetros de operación de la Caldera Piro-tubular

El área de calderas de la planta cuenta con dos calderas encargadas de producir el vapor necesario para alimentar el proceso productivo. Las dos calderas instaladas son de tipo piro-tubular horizontal de 150 BHP.

El responsable de la operación de la caldera sigue una rutina diaria (Anexo B) que implica el registro de los parámetros de funcionamiento y operación de las calderas. Estos registros incluyen datos como la presión, la temperatura, la cantidad de vapor generado, el consumo de gas GLP, los totales de sólidos disueltos (TSD), la dureza del agua y la cantidad de productos químicos utilizados. Esta bitácora desempeña un papel fundamental en la recopilación de información relacionada con la producción de vapor, el consumo de productos químicos y la detección de posibles fallos en el sistema de calderas. Además, estos registros son esenciales para llevar a cabo análisis detallados sobre la eficiencia operativa y el rendimiento del sistema de calderas.

El combustible con el cual las calderas operan es GLP. Es importante destacar que, al tratarse de calderas, es necesario seguir protocolos de seguridad y mantenimiento para evitar riesgos y asegurar su correcto funcionamiento.

Una vez que la caldera ha pasado una inspección y cumple con todas las condiciones de operación requeridas, como el nivel de agua adecuado, el flujo de gas y la presión, se procede a encender el quemador.

El McDonnell es un dispositivo de control electromecánico que utiliza un flotador interno para activar micro interruptores según la altura de la columna de agua dentro de la caldera. Este dispositivo ordena el apagado de la bomba de alimentación de agua condensada en caso de un nivel elevado de agua y la puesta en marcha de la bomba cuando el nivel de agua es bajo mediante un arreglo de contactos normalmente cerrados.

La secuencia de encendido del quemador incluye la pre-ventilación, la fase de encendido, la verificación del funcionamiento con llama y la comprobación de funcionamiento con una señal de llama débil. Después de completar esta secuencia de encendido, el quemador ajusta automáticamente la combustión para aumentar gradualmente tanto la temperatura como la presión, hasta alcanzar una presión de 115 PSI. En este punto, el vapor generado se distribuye a través de la red de vapor hacia los puntos de consumo designados.

En la Figura 4.3 se muestra la ficha técnica de la caldera, que incluye datos generales, parámetros de operación, información del quemador y componentes de la caldera.




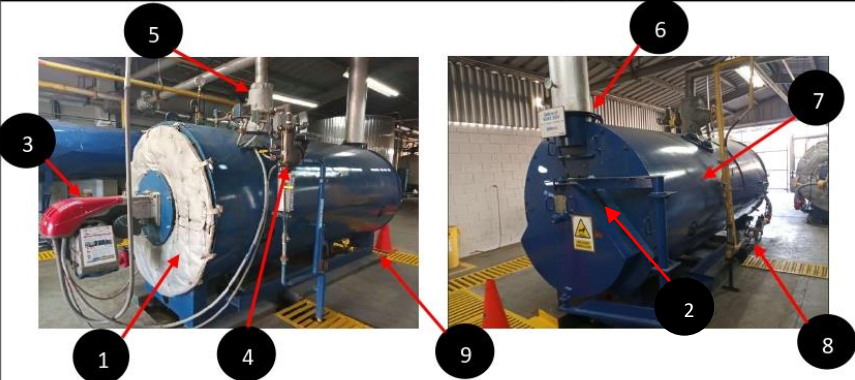
FICHA TÉCNICA DE MAQUINARIA		Ficha N° 1																				
Área: Calderas Departamento: Mantenimiento de instalaciones. Fecha de elaboración: 16/10/2023 Revisión: 16/10/2023		Página 1/1																				
Sistema: Generación de vapor																						
	Máquina: Caldera Función: Generación de vapor saturado Uso: Para proceso de teñido Para proceso de secado Para proceso de lavado																					
	Datos generales																					
Marca: York-Shipley Tipo : Pirotubular Serie: SPHV-150-6 Capacidad: 150 BHP Pasos: 3	Año de fabricación: 2000 Pasos: 3 Combustible: GLP																					
Parametros de operación																						
Rango de presión: 80 PSI - 115 PSI Rango de temperatura: 400°F - 450°F Temperatura de agua condensada: 95 °C																						
Quemador																						
	Marca: Riello Modelo: RS 190 Tipo: 835 T1 Capacidad: 48 hp - 233 hp Frecuencia: 60 Hz Voltaje de control: 120 Vac Voltaje de motor: 220 Vac Tipo de controlador de combustión: Digital /																					
																						
Componentes																						
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>N°</th> <th>Nombre</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Tapa frontal</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Tapa trasera</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Quemador</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Mcdonnell</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Columna</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Chimenea</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Cuerpo</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Tren de gas</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>Purga</td> </tr> </tbody> </table>	N°	Nombre	1	Tapa frontal	2	Tapa trasera	3	Quemador	4	Mcdonnell	5	Columna	6	Chimenea	7	Cuerpo	8	Tren de gas	9	Purga
N°	Nombre																					
1	Tapa frontal																					
2	Tapa trasera																					
3	Quemador																					
4	Mcdonnell																					
5	Columna																					
6	Chimenea																					
7	Cuerpo																					
8	Tren de gas																					
9	Purga																					

Figura 4.3 Ficha Técnica de la Caldera Pirotubular (Elaboración Propia).

4.3. Delimitación de contorno

La norma ISO 14224:2016 permite disgregar en subsistemas el equipo en estudio; para clasificar los componentes en cada subsistema de tal manera que resulte sencillo obtener datos útiles sobre su funcionamiento para luego aplicar estrategias de mantenimiento adecuadas. En este caso facilitar el uso del RCM.

A continuación, se muestra como delimitar las condiciones de contorno según la norma ISO 14224:2016 (ISO, 2016) en su apartado A.2.3.3 Calentadores y Calderas (Figura 4.4) y los subsistemas a tomar en cuenta en la Tabla 4.14.

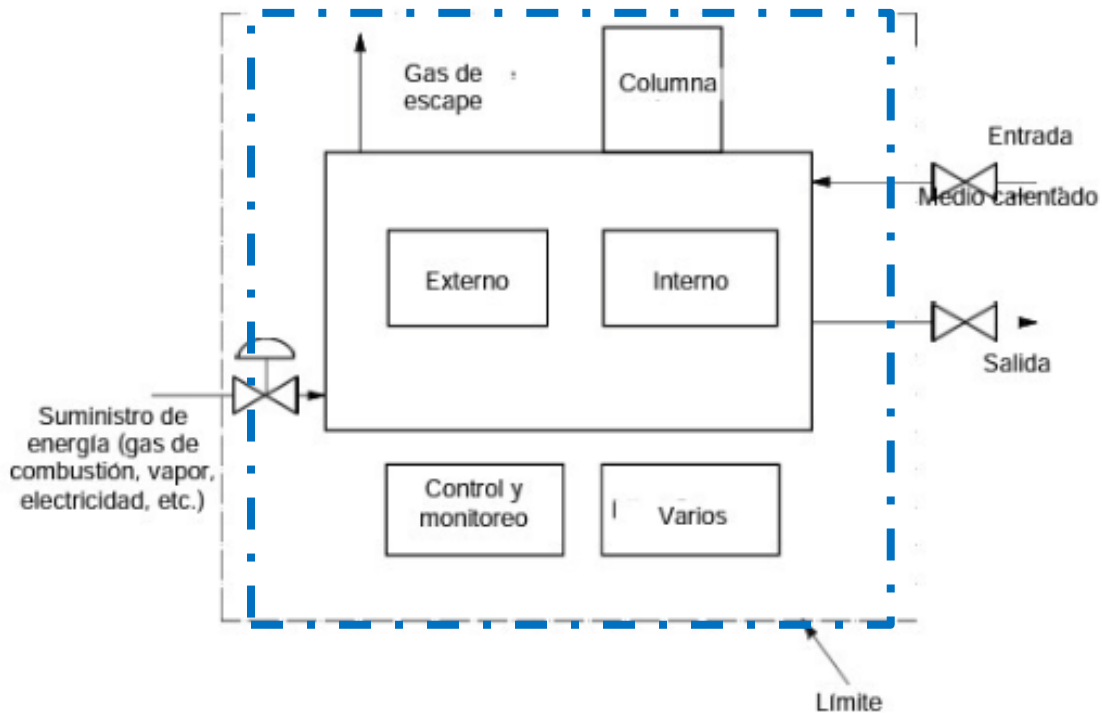


Figura 4.4 Definición de Contorno según ISO 14224:2016 (ISO, 2016).

En base a esta clasificación se procederá con el análisis funcional para cada subsistema donde se ponderará y establecerá su valor de criticidad de riesgo. Este análisis es una herramienta que identifica y clasifica a los subsistemas según su criticidad dentro del proceso desde distintas perspectivas y así ajustar los recursos sobre ellos.

Tabla 4.14 Clasificación de los subsistemas de la caldera según lineamientos ISO 14224:2016 (Elaboración Propia).

Equipo	Calderas					
Sub-unidad	Columna	Equipos externos	Equipos internos	Control y monitoreo	y Varios	
Ítems mantenibles	Cuerpo	Cuerpo externo	Cuerpo interno	Contactador	Ventilador de motor	
	Empaquetadura	Tuberías de alimentación de agua condensada	de Quemador	Botonera	Empaques de compuertas	
	Válvula de paso de vapor	Tuberías de purga	Tubo de humo	Breakers	Visor de llama	
		Soporte	Cámara de Combustión	Controlador de quemador	Empaques de quemador	
		Válvulas de seguridad	de Electroodos	Controlador de llama	Visor de nivel de agua	
			Transformador de ignición	Suministro de energía eléctrica interna		
				Pressuretrol de operación		
				Manómetro de presión		
				Manómetro de temperatura		
				Válvula de control de gas		
			Válvula reguladora de aire			
			Mcdonell			

4.4. Análisis de modo y efectos de falla a sistema crítico

Este análisis de modos de fallo, efectos y criticidad (AMFEC) se aplicó a los subsistemas identificados anteriormente en la Tabla 4.14, que representan componentes significativos para el plan de mantenimiento. Se basó en datos históricos y registros operativos de la caldera pirotubular con el objetivo de identificar los modos de fallo potenciales que podrían dar lugar a disfunciones y, al mismo tiempo, determinar los efectos adversos asociados a cada uno de estos modos de fallo. Para obtener la información necesaria, se estableció una comunicación continua con el personal de mantenimiento. Además, se administró una encuesta al personal que participa en las operaciones de mantenimiento

en la empresa textil (Anexo C) y se aprovechó el juicio de expertos (peritos) para recopilar la máxima cantidad de datos disponible en relación con las fallas.

Dado que las dos calderas pirotubulares son idénticas en diseño y funcionamiento, se optó por realizar el AMFEC en una de las calderas y aplicar los mismos resultados a la otra. Un aspecto crucial en este proceso fue la asignación de un Número de Ponderación de Riesgo (NPR) a cada modo de fallo. Sin embargo, en el marco del RCM, se pone un enfoque especial en la gestión de los fallos y en las posibles consecuencias que estos pueden conllevar.

Gravedad

El índice de gravedad (G) desempeña un papel fundamental en la asignación de la criticidad apropiada a cada componente. Para clasificar esta gravedad, se utilizó una tabla que se categorizó mediante una escala de Likert (Guil Bozal, 2006) que abarca valores del 1 al 10, tal como se ilustra en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 Clasificación del índice de gravedad (Gardella González, 2011).

VALOR 	DESCRIPCIÓN DE LA GRAVEDAD
1	Las consecuencias del fallo son despreciables. Ninguna trascendencia para la seguridad y afines, producción y calidad. Eventualmente pueden tener alguna mínima consecuencia para el coste directo del Mantenimiento.
2 y 3	No hay consecuencias para seguridad y afines, producción y calidad; puede tener alguna consecuencia baja o moderada para los costes directos del mantenimiento.
4,5 ó 6	Los efectos tienen consecuencia importante en los costes directos del mantenimiento y una pequeña influencia adversa en la producción y/o calidad, pudiendo causar paradas cortas no programadas, ciertas mermas o rechazo de calidad. Pueden causar pequeños fallos secundarios ocultos de poca importancia. Ninguna influencia en la seguridad y medio ambiente.
7 y 8	Importante impacto del efecto de fallo en la producción y/o calidad y/o elevados costes directos de mantenimiento. También se consideran en este rango importantes fallos en cadena ocultos. Se consideran también pequeños o moderados efectos negativos para la seguridad y afines.
9 y 10	Se trata de graves consecuencias para seguridad y afines. También entran interrupciones muy costosas por concepto de impacto en la producción y/o calidad.

Frecuencia de fallos

El índice de frecuencia de fallos (F) se define como la cantidad de eventos de falla experimentados por un componente en un período específico de tiempo. Se asignaron intervalos a esta frecuencia

utilizando una escala de Likert (Guil Bozal, 2006) que abarca valores del 1 al 10, y se determinó la frecuencia de fallos basándose en datos históricos, como se detalla en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16 Clasificación de frecuencia de fallos (Gardella González, 2011).

VALOR	FRECUENCIAS DE FALLOS
1	Tasa de fallos: menos de 1 en más de 10 años.
2	Tasa de fallos: entre 1 y 3 en más de 10 años.
3	Tasa de fallos: entre 1 y 3 en 10 años.
4	Tasa de fallos: entre 1 y 3 en 5 años.
5	Tasa de fallos: entre 1 y 3 en 2 años.
6	Tasa de fallos: entre 1 y 3 por año.
7	Tasa de fallos: entre 1 y 3 cada seis meses.
8	Tasa de fallos: entre 1 y 3 cada dos meses.
9	Tasa de fallos: entre 1 y 3 cada semana.
10	Tasa de fallos: entre 1 y 3 por día.

Detectabilidad

El índice de detectabilidad (D) se refiere a la dificultad de asociar un modo de fallo en un componente. También se evaluó mediante intervalos clasificados en una escala de Likert (Guil Bozal, 2006) que abarca valores del 1 al 10, y se determinó en función de la ubicación y el contexto en que ocurrió la falla, como se detalla en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17 Clasificación del índice de detectabilidad (Gardella González, 2011).

VALOR	DESCRIPCIÓN
1	No hay ninguna duda de que el fallo será detectado de inmediato, por cualquier persona y sin ambigüedad.
2	La detección es prácticamente certera. Probablemente habrá que verla algún técnico u operario especializado.
3,4,5	La detección es razonablemente fiable. Hay que aplicar algún método, técnica o instrumento y/o tardar algún tiempo en diagnosticar definitivamente.
6,7,8	La detección entraña riesgos de no acertar, se necesitan medios y tiempo relativamente largo para diagnosticar el fallo.
9 y 10	La detección es extremadamente difícil, o prácticamente inviable en las condiciones tecnológicas actuales.

Cálculo de ponderación de riesgo

El NPR se emplea con el fin de cuantificar el riesgo asociado a una falla en un equipo o componente específico, y para priorizar su tratamiento dentro del análisis. Este valor se determina mediante la siguiente Ecuación 4.4, que multiplica los índices de Gravedad, Frecuencia de Fallo y Detectabilidad. La utilidad principal del NPR radica en su capacidad para alertar al analista, en mayor o menor medida, sobre la necesidad de fortalecer los métodos de mantenimiento.

$$NPR = G \times F \times D \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Los valores de NPR se clasifican en un rango que van desde 0 hasta 1000, siguiendo la metodología propuesta por Moubray. Un rango menor a 75 se considera Bajo. Un rango de 75 a 200 se considera Medio. Un rango de 200 a 1000 se considera Alto (Moubray, J., 2004).

En relación con las funciones y los fallos funcionales, se establecieron tres categorías de modos de fallo y se asignaron los efectos correspondientes a cada una de ellas. Luego, se evaluaron las consecuencias de cada efecto de fallo. En la Tabla 4.18 se presenta el resultado de la ponderación de riesgo para todos los componentes

Tabla 4.18 Ponderación de riesgo para todos los componentes de la caldera pirotubular (Elaboración Propia).

Nº	Componente	NPR	Ranking Críticidad	Nº	Componente	NPR	Ranking Críticidad
1	Cuerpo	9	30	17	Breakers	10	20
2	Empaquetadura	56	8	18	Controlador de quemador	10	21
3	Válvula de paso de vapor	20	13	19	Controlador de llama	10	22
4	Cuerpo externo	5	31	20	Suministro de energía eléctrica interna	10	23
5	Tuberías de alimentación de agua condensada	37	9	21	Pressuretrol de operación	10	24
6	Tubería de purga	200	4	22	Manómetro de presión	10	25
7	Soporte	10	28	23	Manómetro de temperatura	10	26
8	Válvulas de seguridad	10	29	24	Válvula de control de gas	15	16
9	Cuerpo interno	63	7	25	Válvula reguladora de aire	15	17

10	Quemador	240	3	26	McDonnell	140	5
11	Tubos de humo	490	1	27	Ventilador de motor	10	27
12	Cámara de combustión	63	6	28	Empaques de compuertas	15	15
13	Electrodos	350	2	29	Visor de llama	35	10
14	Transformador de ignición	21	12	30	Empaques de quemador	20	14
15	Contactador	10	18	31	Visor de nivel de agua	35	11
16	Botonera	10	19				

La matriz completa se presenta en detalle en el Anexo D. Tras el análisis, se identificaron como los componentes más críticos, debido al indicador NPR, los siguientes: Tubos de Humo con NPR = 490, Quemador con NPR = 240, Tubería de purga con NPR = 200 y McDonnell con NPR = 140.

4.5. Plan de mantenimiento propuesto

A partir del árbol lógico de decisión presentado en el capítulo anterior (Figura 3.2), se realizan las preguntas para cada modo de falla de los componentes críticos sugiriendo la aplicación de las tareas de mantenimiento para reducir la tasa de fallas y mejorar la confiabilidad, a su vez implica la selección de tareas de mantenimiento particulares basadas en las consecuencias de la falla. El tipo binario de diagrama de decisión (respuestas Sí/No) se puede utilizar para seleccionar diversas tareas de mantenimiento, como CM, PdM, CBM, PM, RTF. La efectividad general de la tarea de mantenimiento seleccionada debe ser evaluado sobre la base de criterios específicos tales como la reducción de irregularidades operativas, vida útil, reducción de los costos de reparación, repuestos y herramientas, tiempo de inactividad, mantenimiento y el tiempo requerido para las reparaciones. El modelo propuesto se emplea con el propósito de identificar y seleccionar las tareas de mantenimiento más adecuadas para los componentes críticos y sus modos de fallo en el sistema de caldera de vapor. Los resultados obtenidos a través de este proceso se detallan en la Tabla 4.19. En el Anexo E se muestra el plan completo.

Tabla 4.19 Selección de Tareas de Mantenimiento (Elaboración Propia).

N°	Componente	Modos de fallo	Criticidad	Tarea de mantenimiento	Descripción de tarea mantenimiento	
1	Cuerpo	Fugas de vapor	Corrosión	Bajo	PdM	Inspeccionar las placas, Realizar prueba hidrostática
			Deformación estructural	Bajo	PdM	

			Agrietamiento estructural	Bajo	PdM	al 50% a la presión de trabajo durante una hora, debe ser realizado por personal especializado
			Fatiga estructural	Bajo	PdM	
2	Empaquetadura		Desgaste del empaque	Bajo	PM	Revisar la empaquetadura
			Deterioro de empaque de la tubería	Bajo	PdM	Inspeccionar los puntos calientes
3	Válvula de paso de vapor	Pérdida de control	Bloqueo externo	Bajo	PM	Revisar si existe un bloque de piezas externas
			Fugas de vapor	Bajo	PM	Revisar válvula de vapor
			Obstrucción en tubería de salida de vapor	Bajo	PM	Revisar componentes de la válvula check-globo
4	Cuerpo externo	Daños Mecánicos	Corrosión	Bajo	PM	Revisar el aislamiento térmico del cuerpo
			Golpes	Bajo		
			Desgaste	Bajo		
5	Tuberías de alimentación de agua condensada	Fugas de agua	Corrosión	Bajo	PM	Revisar toda las tuberías y retorno de condensado
			Obstrucción	Bajo	PM	Verificar el estado y funcionamiento de las trampas de vapor y accesorios en el retorno de condensado
			Elevación de temperatura	Bajo	PM	Verificar la temperatura del agua del condensado
6	Tubería de purga	Bloqueo	Corrosión	Medio	PM	Revisar todas las tuberías
			Obstrucción	Medio	PM	Efectuar purgas de fondo
7	Soporte	Debilidad estructural	Corrosión	Bajo	PM	Realizar mantenimiento de la estructura
			Deformación	Bajo	PM	
8	Válvulas de seguridad	No se abre en caso de emergencia	Corrosión	Bajo	PM	Revisar, limpiar y probar las válvulas de seguridad
			Obstrucción	Bajo	PM	
9	Cuerpo interno	Fugas de vapor	Corrosión	Bajo	PM	Verificar el estado general
			Agrietamiento	Bajo		

						Revisar el funcionamiento del quemador, desarmando y limpiando el sistema de encendido y los electrodos
10	Quemador	Fallo de encendido, mal funcionamiento	Obstrucción	Medio	PM	
			Desgaste	Medio	Reemplazo	Desmontaje totalmente del quemador y cambiar los componentes en mal estado. Cambiar toberas y electrodos
			Corrosión	Alto	PdM	Revisión de tubos
11	Tubos de humo	Fugas de gases de humo	PH del agua suavizada	Alto	PdM	Controlar el PH del agua suavizada que este entre los valores de 8.5 -10
			Obstrucción	Alto	PM	Realizar limpieza mecánica de los tubos de humo (deshollinado)
12	Cámara de combustión	Sobrecalentamiento	Agrietamiento	Bajo	PM	Verificar el estado por fisuras
13	Electrodos	Fallo de ignición	Desgaste	Alto	PM	Verificación y Limpieza del electrodo
14	Transformador de ignición	Fallo de encendido	Fallo eléctrico	Bajo	PM	Verificar funcionamiento
15	Contactador	Fallo en el control	Fallo eléctrico	Bajo	PM	Verificar funcionamiento
16	Botonera	Fallo de botones, mal funcionamiento	Daño mecánico	Bajo	PM	Verificar funcionamiento
17	Breakers	No se activa en caso de cortocircuito	Fallo eléctrico	Bajo	PM	Verificar funcionamiento
18	Controlador de quemador	Pérdida de control	Fallo electrónico	Bajo	PM	Verificar el correcto funcionamiento del programador
19	Controlador de llama	Pérdida de control	Fallo electrónico	Bajo	PM	Verificar la forma y color de llama
20	Suministro de energía eléctrica interna	Pérdida de suministro	Fallo eléctrico	Bajo	PM	Revisar todo el sistema eléctrico

21	Pressuretrol de operación	Pérdida de control	Bloqueo	Bajo	PM	Verificar funcionamiento
22	Manómetro de presión	Lectura incorrecta	Daño en la escala	Bajo	PM	Verificar los valores del manómetro
23	Manómetro de temperatura	Lectura incorrecta	Daño en la escala	Bajo	PM	Verificar los valores del termómetro de gases
24	Válvula de control de gas	Pérdida de control	Bloqueo	Bajo	PM	Verificar la presión de combustible (GLP)
			Fugas	Bajo	PM	Revisar, limpiar y probar válvula solenoide y controles
25	Válvula reguladora de aire	Pérdida de control	Bloqueo	Bajo	PM	Revisar, limpiar y probar válvula solenoide y controles
			Obstrucción	Bajo	PM	
26	McDonnell	Pérdida de control	Bloqueo	Medio	PM	Revisar estado general
			Fugas	Medio	PM	Cambiar las empaquetaduras del tubo visor del nivel de agua
27	Ventilador de motor	Fallo en el funcionamiento	Bloqueo	Bajo	PM	Revisar el funcionamiento del ventilador del quemador
			Desgaste	Bajo	PM	Lubricar los rodamientos y piezas móviles
28	Empaques de compuertas	Fugas de aire, gases o vapor	Daño mecánico	Bajo	PM	Comprobar que no hay fugas de gases, en los empaques de ambas tapas, ni visor.
			Desgaste	Bajo	PM	Cambiar empaquetaduras de compuertas
29	Visor de llama	No detecta la llama	Daño mecánico	Bajo	PM	Revisar el visor de llama
			Suciedad	Bajo	PM	Limpiar visor de llama
30	Empaques de quemador	Fugas de aire o combustible	Daño mecánico	Bajo	PM	Revisar la empaquetadura
			Desgaste	Bajo	PM	

31	Visor de nivel de agua	No detecta el nivel de agua	Daño mecánico	Medio	PM	Revisar el visor de nivel de agua
			Suciedad	Medio	PM	Limpiar visor de nivel de agua

La propuesta del plan de mantenimiento se presenta como una guía inicial y no como una versión definitiva. Su propósito es establecer una estructura preliminar que pueda adaptarse según las necesidades específicas de la empresa, con la expectativa de que evolucione a medida que se lleva a cabo su implementación. Este proceso dinámico de evolución contempla ajustes que no solo se basarán en la retroalimentación del personal operativo y de mantenimiento, sino también en la información recopilada a través de los registros de mantenimiento.

Es fundamental tener en cuenta que en el registro de datos actual se incluyen algunas fallas que no son recurrentes y que pueden atribuirse a la mala ejecución de un mantenimiento puntual. Estos casos particulares requieren una consideración especial al evaluar la efectividad del plan. La revisión continua de los registros facilitará la identificación de patrones, tendencias y situaciones específicas, permitiendo así realizar ajustes en el plan para abordar de manera más efectiva las necesidades y desafíos particulares de la empresa.

Para el plan se asignarán los intervalos de mantenimiento, basado en el NPR previo calculado. A los componentes críticos se les realizó los cálculos de confiabilidad que emplea la distribución de Weibull (Olazo Quispe, 2017). En el contexto de la confiabilidad, se recomienda un valor de $R(t) = 0.75$, como se sugiere en el estudio de Patil & Bewoor (Patil & Bewoor, 2020). Utilizando este valor como referencia, se puede calcular el tiempo de mantenimiento para cada tarea correspondiente a los componentes críticos de la caldera con la Ecuación 4.5.

$$\text{Tiempo de mantenimiento } t = \theta x [-\ln(0.75)]^{\frac{1}{\beta}} \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

donde, 't' es el intervalo de tiempo de mantenimiento, θ es el parámetro de la escala de Weibull y β es el parámetro de forma de Weibull (Alebrant Mendes & Duarte Ribeiro, 2014).

Para llevar a cabo estos cálculos, se utilizan datos como el Tiempo de Operación (TO) y el Tiempo Fuera de Servicio (TFS) de dichos componentes recopilados a lo largo de un periodo de 3 años. Luego se calcularon los valores de θ , β y t para cada componente crítico y los resultados se detallan en la Tabla 4.20. Los cálculos específicos de θ y β se presentan en el Anexo F.

Tabla 4.20 Valores de θ y β de componentes críticos (Elaboración Propia).

Componente	θ	β	t (intervalo de tiempo)
Tubería de Purga	4374.71	0.80	Diario / Mensual
Quemador	4,136	0.29	Semanal / Mensual / Anual
Tubos de humo	1713.77	0.49	Diario / Semestral
McDonnell	6411.24	0.42	Mensual

A continuación, se muestra en la Tabla 4.21 los intervalos de mantenimiento recomendados para los componentes críticos. El resto de los componentes tuvieron sus tiempos indicados en base al manual de mantenimiento, criterios expertos y al marco legal de El Salvador.

El MTTF en horas se calculó según la determinación de la distribución actualizada de la frecuencia de fallas apoyándose en el Teorema de Bayes; debido que permite combinar esta información con la correspondiente sobre frecuencias de falla proveniente de bancos de información como OREDA (Oreda, 2002), facilitando la obtención de estimados de la frecuencia de falla más robustos y cercanos a la realidad (Yáñez et al., 2005). Los cálculos se presentan en el Anexo G.

Tabla 4.21 Intervalos de Mantenimiento Recomendados (Elaboración Propia).

ítem	Componente	MTTF (Horas)	Tiempo de mantenimiento recomendado
1	Cuerpo	157,445.75	12 meses
2	Empaquetadura	33,845.75	6 meses
3	Válvula de paso de vapor	37,649.92	Diario /12 meses
4	Cuerpo externo	148,537.29	12 meses
5	Tuberías de alimentación de agua condensada	28,901.75	Diario / Mensual
6	Tubería de purga	11,597.75	Diario / Mensual
7	Soporte	149,723.98	12 meses
8	Válvulas de seguridad	50,843.98	Mensual
9	Cuerpo interno	149,723.98	12 meses
10	Quemador	30,804.21	Mensual / 12 meses
11	Tubos de humo	104,964.21	Diario / Semanal /Semestral
12	Cámara de combustión	49,657.29	12 meses
13	Electrodos	2,689.29	Semanal
14	Transformador de ignición	16,235.98	Mensual
15	Contactador	50,843.98	Mensual
16	Botonera	50,843.98	Mensual
17	Breakers	50,843.98	Mensual
18	Controlador de quemador	50,843.98	Diario
19	Controlador de llama	26,123.98	Diario

20	Suministro de energía eléctrica interna	26,123.98	12 meses
21	Pressuretrol de operación	51,721.54	Mensual
22	Manómetro de presión	12,169.54	6 meses
23	Manómetro de temperatura	12,169.54	6 meses
24	Válvula de control de gas	26,123.98	Mensual
25	Válvula reguladora de aire	26,123.98	Mensual
26	McDonnell	150,601.54	Mensual
27	Ventilador de motor	26,123.98	Diario / Mensual
28	Empaques de compuertas	14,069.75	6 meses
29	Visor de llama	12,169.54	Mensual
30	Empaques de quemador	33,845.75	6 meses
31	Visor de nivel de agua	7,225.54	Mensual

4.6. Comparación de Confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad de que un equipo funcione el máximo tiempo posible sin fallar, operando en condiciones estándar de trabajo, es decir, la probabilidad de que no falle (Acuña, 2003). Los subsistemas se componen de una serie de componentes individuales que están interrelacionados, y cada uno de estos componentes desempeña una función específica (Acuña, 2003). Cuando uno de estos componentes falla, ya sea por cualquier razón, puede resultar en una falla del sistema en su totalidad. La configuración de muchos subsistemas puede ser considerada en serie, en paralelo o una combinación de ambos, dependiendo de su diseño (Acuña, 2003). Para evaluar la confiabilidad del sistema de caldera de vapor, se llevó a cabo una comparación entre los resultados de confiabilidad del plan de mantenimiento actual y la propuesta. La confiabilidad del sistema completo se evaluó utilizando el diagrama de bloques de confiabilidad desarrollado, el cual se ilustra en la Figura 4.5. Además, se indican los diferentes códigos utilizados en el diagrama de bloques de confiabilidad en la Tabla 4.22.

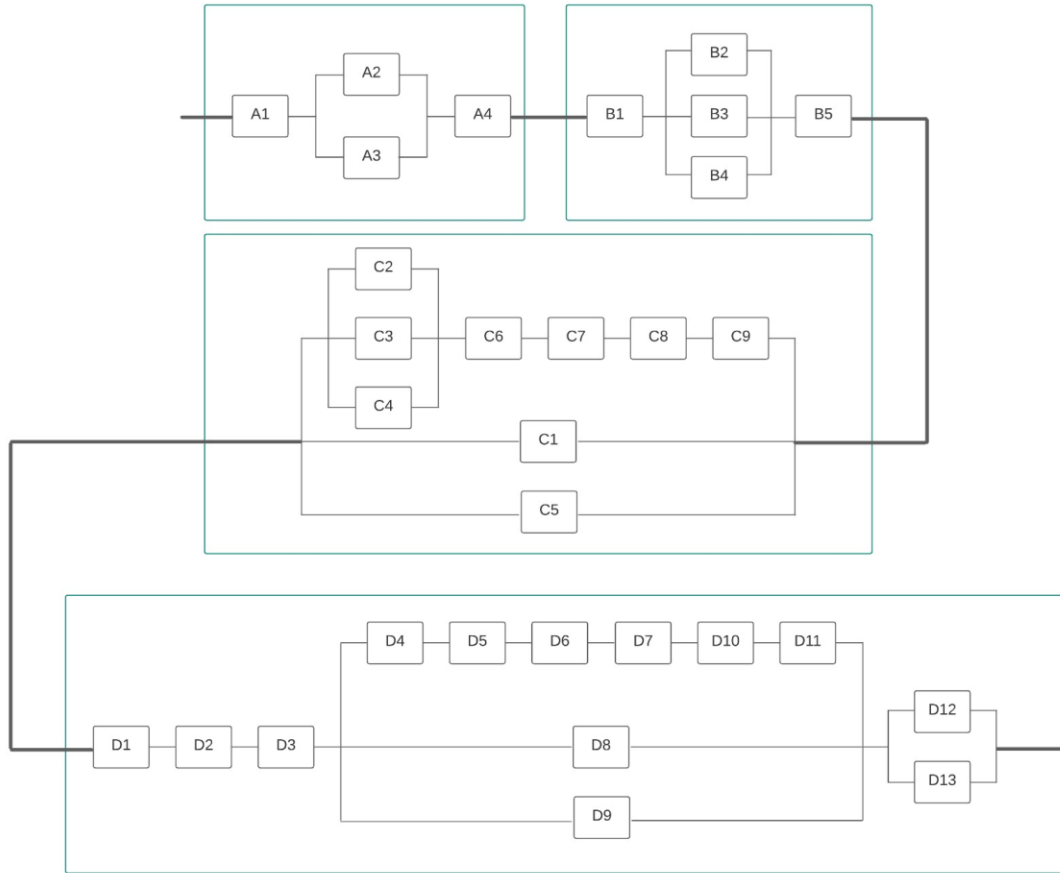


Figura 4.5 Diagrama de bloques de los subsistemas y componentes de la caldera pirotubular (Elaboración Propia).

Tabla 4.22 Códigos de los componentes para diagrama de bloque de confiabilidad (Elaboración Propia).

Componente	Código	Componente	Código	Componente	Código	Componente	Código
Cuerpo	A1	Cuerpo interno	C1	Contactador	D1	Válvula de control de gas	D10
Empaquetadura	A2	Quemador	C2	Botonera	D2	Válvula reguladora de aire	D11
Empaques de compuertas	A3	Visor de llama	C3	Breakers	D3	Visor de nivel de agua	D12
Válvula de paso de vapor	A4	Empaques de quemador	C4	Controlador de quemador	D4	McDonnell	D13
Cuerpo externo	B1	Ventilador de motor	C5	Controlador de llama	D5		
Tuberías de alimentación	B2	Tubos de humo	C6	Suministro de energía	D6		

de agua condensada			eléctrica interna		
Tubería de purga	B3	Cámara de combustión	C7	Pressuretrol de operación	D7
Soporte	B4	Electrodos	C8	Manómetro de presión	D8
Válvulas de seguridad	B5	Transformador de ignición	C9	Manómetro de temperatura	D9

Las Ecuaciones 4.6 y 4.7 son los modelos de confiabilidad desarrolladas para el cálculo en el sistema de caldera de vapor.

$$R_{\text{Sistema Caldera}} = R_A \times R_B \times R_C \times R_D \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

$$R_{\text{Sistema Caldera}} = \left\{ \left[R_{A1} \times (1 - (1 - R_{A2}) \times (1 - R_{A3})) \times R_{A4} \right] \times \left[R_{B1} \times (1 - (1 - R_{B2}) \times (1 - R_{B3}) \times (1 - R_{B4})) \times R_{B5} \right] \times \left[1 - \left((1 - (1 - (1 - R_{C2}) \times (1 - R_{C3}) \times (1 - R_{C4})) \times R_{C6} \times R_{C7} \times R_{C8} \times R_{C9}) \times (1 - R_{C1}) \times (1 - R_{C5})) \right) \right] \times \left[R_{D1} \times R_{D2} \times R_{D3} \times (1 - (1 - (R_{D4} \times R_{D5} \times R_{D6} \times R_{D7} \times R_{D10} \times R_{D11}))) \times (1 - R_{D8}) \times (1 - R_{D9}) \right] \times (1 - (1 - R_{D12}) \times (1 - R_{D13})) \right\}$$

(Ecuación 4.7)

donde R_A, R_B, \dots, R_D , son las confiabilidades de los subsistemas de la caldera pirotubular.

La confiabilidad actual del sistema de caldera de vapor se calcula de la siguiente manera:

$$R_{\text{Sistema Caldera (Actual)}} = R_A \times R_B \times R_C \times R_D$$

$$R_{\text{Sistema Caldera (Actual)}} = 0.7424 \times 0.8697 \times 0.9945 \times 0.6545$$

$$R_{\text{Sistema Caldera (Actual)}} = 0.4202$$

De manera similar, la confiabilidad del sistema de caldera de vapor propuesta se calcula de la siguiente manera:

$$R_{Sistema\ Caldera\ (Propuesta)} = R_A \times R_B \times R_C \times R_D$$

$$R_{Sistema\ Caldera\ (Propuesta)} = 0.8162 \times 0.8769 \times 0.9952 \times 0.6852$$

$$R_{Sistema\ Caldera\ (Propuesta)} = 0.4881$$

Por lo tanto, el cambio en la confiabilidad del sistema = confiabilidad propuesta del sistema - confiabilidad actual del sistema.

$$R_{Sistema\ Caldera\ (Propuesta)} - R_{Sistema\ Caldera\ (Actual)} = 0.4881 - 0.4202 = 0.0679 \text{ (16.15\% incremento)}$$

A continuación, se presentan los resultados de confiabilidad de todos los componentes evaluados en la Tabla 4.23 considerando la distribución exponencial según Ecuación 4.8.

$$R(t) = e^{-FF \times t} \quad \text{(Ecuación 4.8)}$$

También, utilizando el MTTF mejorado y el MTTR para el mantenimiento preventivo, se presenta la disponibilidad a la falla (*A*, *Availability*) de los componentes, estimada de la siguiente manera con la Ecuación 4.9:

$$A_{falla} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad \text{(Ecuación 4.9)}$$

Tabla 4.23 Confiabilidad y Disponibilidad de los Componentes (Elaboración Propia).

Item	Componente	R (t)	R (t)	A(t)	A(t)
		actual	propuesto	actual	propuesto
1	Cuerpo	0.9672	0.9694	0.999676	0.999695
2	Empaquetadura	0.8187	0.8643	0.999676	0.999764
3	Válvula de paso de vapor	0.8669	0.8772	0.999653	0.999681
4	Cuerpo externo	0.9672	0.9680	0.999192	0.999193
5	Tuberías de alimentación de agua condensada	0.7788	0.8430	0.999596	0.999723
6	Tubería de purga	0.1353	0.6534	0.996774	0.999311
7	Soprote	0.9672	0.9678	0.999676	0.999680
8	Válvulas de seguridad	0.9048	0.9075	0.999838	0.999843
9	Cuerpo interno	0.9672	0.9691	0.998384	0.998400
10	Quemador	0.8187	0.8530	0.998062	0.998444

11	Tubos de humo	0.9512	0.9562	0.997579	0.997719
12	Cámara de combustión	0.9048	0.9061	0.999030	0.999034
13	Electrodos	0.1353	0.1593	0.998384	0.998515
14	Transformador de ignición	0.7165	0.7377	0.999730	0.999754
15	Contactador	0.9048	0.9074	0.999919	0.999921
16	Botonera	0.9048	0.9074	0.999939	0.999941
17	Breakers	0.9048	0.9074	0.999919	0.999921
18	Controlador de quemador	0.9048	0.9074	0.999899	0.999902
19	Controlador de llama	0.8187	0.8277	0.999838	0.999847
20	Suministro de energía eléctrica interna	0.8187	0.8277	0.999879	0.999885
21	Pressuretrol de operación	0.9048	0.9089	0.999919	0.999923
22	Manómetro de presión	0.6065	0.6664	0.999596	0.999671
23	Manómetro de temperatura	0.6065	0.6664	0.999596	0.999671
24	Válvula de control de gas	0.8187	0.8299	0.997096	0.997251
25	Válvula reguladora de aire	0.8187	0.8276	0.999919	0.999923
26	McDonnell	0.9672	0.9679	0.999757	0.999761
27	Ventilador de motor	0.8187	0.8278	0.999676	0.999694
28	Empaques de compuertas	0.3679	0.7042	0.997981	0.999290
29	Visor de llama	0.6065	0.6664	0.999495	0.999589
30	Empaques de quemador	0.8187	0.8653	0.998062	0.998584
31	Visor de nivel de agua	0.3679	0.5046	0.999596	0.999723

El resultado obtenido hace referencia a que la probabilidad de que el sistema funcione correctamente ha mejorado en un 16.15%; sin embargo, se debe trabajar en el mejoramiento de los componentes individuales que tengan una confiabilidad más baja. Con respecto a la disponibilidad, se observa un muy leve aumento del 0.004%, pasando de 0.997174 a 0.997211.

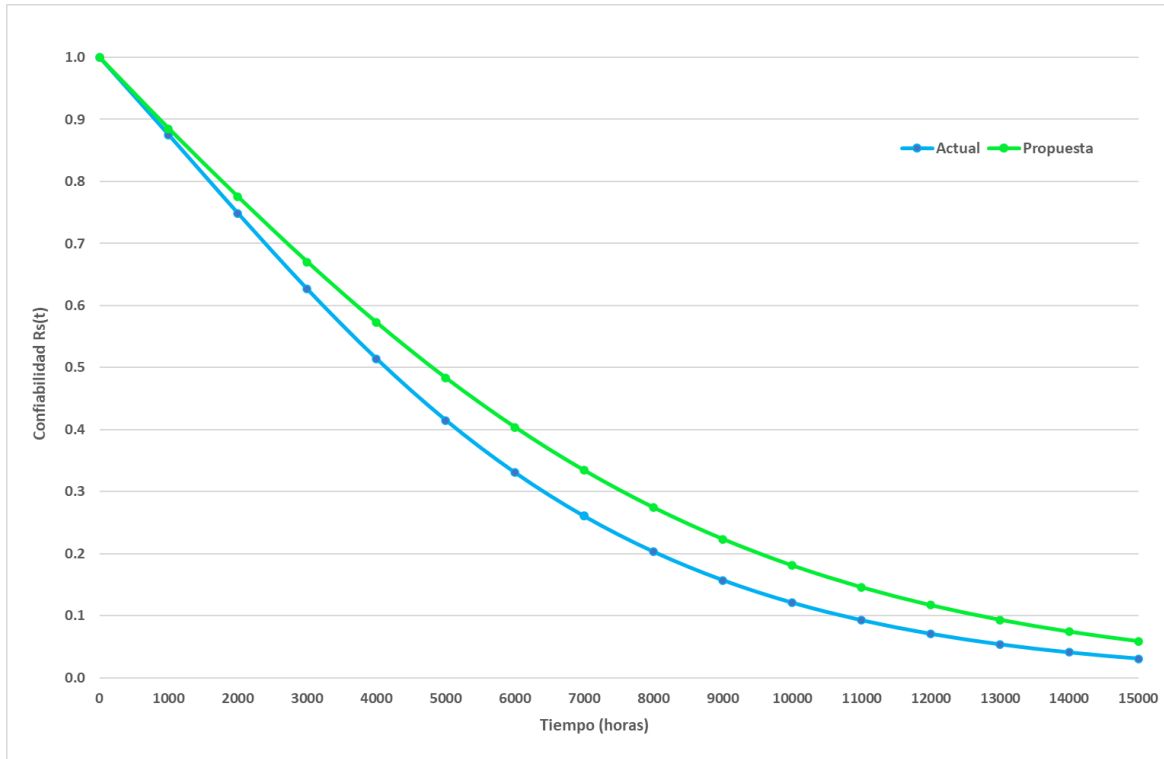


Figura 4.6 Gráfica de confiabilidad vs el tiempo de operación en horas del sistema de caldera (Elaboración Propia).

En la Figura 4.6 se muestra el gráfico de "confiabilidad alcanzable versus tiempo" que se construyó utilizando las ecuaciones 4.6 y 4.7 para las dos situaciones: actual y propuesto. La confiabilidad en función del tiempo en el gráfico tiene el nivel de tendencia esperado: dos exponenciales negativas con diferente flexión debido a diferentes frecuencias de falla. Existen diferencias significativas, destacando que a partir de aproximadamente las 1000 horas de uso se va observando la mejora y, en particular, a las 5000 horas (un año de operación), el aumento de confiabilidad obtenido por la configuración propuesta es aproximadamente del 16%. Además, luego de 20,000 horas (4 años), el comportamiento de las curvas tiende a ser iguales debido al desgaste natural de la caldera.

4.7. Análisis de Costos

Como en cualquier plan, es fundamental evaluar su rentabilidad. Para llevar a cabo esta evaluación, se recopilaron los costos asociados al plan de mantenimiento actual. Estos costos se compararon posteriormente con los costos proyectados del plan propuesto, con el objetivo de determinar los beneficios que se derivarían de su implementación.

4.7.1. Costos del Plan de Mantenimiento Actual

Actualmente el CM se lleva a cabo con el personal interno de la planta, mientras que el PM se realiza subcontratando a servicios externos. Por cuestiones de confidencialidad, no se proporciona un desglose detallado de los costos específicos.

Tabla 4.24 Costos de Mano de obra para caldera (Elaboración Propia).

Puesto	Salario Mensual	ISSS patronal (7.50%)	AFP patrona 1 (7.75%)	INSAF ORP patrona 1 (1%)	Provisión indemnización (8.33%)	Provisión vacación (5.42%)	Provisión aguinaldo (6%)	Costo empresa Mensual	hora total/ mes	costo por hora
Superintendente	\$2,000	\$75.00	\$155	\$10.00	\$166.60	\$108.40	\$120.00	\$2,635	176	\$14.9
Ingeniero	\$1,000	\$75.00	\$77.50	\$10.00	\$83.30	\$54.20	\$60.00	\$1,360	176	\$7.73
Supervisor	\$800	\$60.00	\$62.00	\$8.00	\$66.64	\$43.36	\$48.00	\$1,088	176	\$6.18
Operador	\$650	\$48.75	\$50.38	\$6.50	\$54.15	\$35.23	\$39.00	\$884	176	\$5.02
Mecánico	\$650	\$48.75	\$50.38	\$6.50	\$54.15	\$35.23	\$39.00	\$884	176	\$5.02
Total								\$6,851		

Los montos de mano de obra descritos en la Tabla 4.24 son un estimado de los salarios del personal técnico involucrado para el mantenimiento de la caldera de la planta textil.

En la Tabla 4.25 se presenta el resumen de los costos anuales relacionados con estas actividades, el cálculo detallado se muestra en el Anexo H.

Tabla 4.25 Resumen de Costos Anuales del Plan de Mantenimiento Actual (CM y PM) (Elaboración Propia).

Costo Anuales de CM, PM y PM (Externo)				
Mano Obra (Interno)	Repuestos y Materiales	Mantenimiento y Peritaje Externo (incluye MO y Herramientas)	Mediciones Externo	Costos de perdida de producción por año
\$5,150.66	\$1,917.51	\$ 2,560	\$ 500	\$84,411.29
Total Anual \$ 94,539.46				

4.7.2. Costos del Plan de Mantenimiento Propuesto

De manera similar, se ha evaluado el coste de mantenimiento debido al mantenimiento correctivo y al mantenimiento preventivo. Se consideran varios costos tales como: costo de falla, costo de pieza, costo logístico y costo de pérdida de producción para estimar los costos de mantenimiento. Además, para cuantificar el costo de falla del componente por año, se tienen en cuenta la tasa de falla de los componentes, el tiempo medio de reparación, los costos de mano de obra y numero de persona involucradas en las actividades. El modelo de costo de mantenimiento utilizado se muestra en la Ecuación 4.10.

$$Costo\ de\ Mantenimiento = (FF_i \times MTTR_i \times C_{li} \times N^\circ) + C_{pci} + C_{logi} + C_{pp}$$

(Ecuación 4.10)

Dónde:

- FF_i = Frecuencia de fallos por componente por año
- $MTTR_i$ = Tiempo promedio de reparación por componente i , en horas.
- Cl_i = Costos directos de corrección por fallos de mano de obra por componente i , \$/hora.
- N° = Números de personas requeridas para la reparación.
- C_{pci} = Costo del componente por año, en \$
- C_{logi} = Costo de logística por año por componente i , en \$
- C_{ppi} = Costo de pérdida de producción por componente i , en \$

Como ejemplo, se presenta el costo de mantenimiento de un componente específico. En este caso, los tubos de humo de la caldera, y se calcula de la siguiente manera:

$$MTTF_1 = 104,964.21 \text{ horas}$$

La frecuencia de falla por año se calcula con la Ecuación 4.11:

$$FF_1 = \frac{t}{MTTF_1} \quad (\text{Ecuación 4.11})$$

donde t es el tiempo total de operación del componente; y se estiman 206 días hábiles de operación de la caldera en un año. Teniendo el MTTR del componente se calcula:

$$\text{Tiempo total de operación del componente} = 4,944 - 240 = 4,704 \text{ horas}$$

Por tanto, el número esperado de fallos por año de los tubos de humo es el siguiente:

$$FF_1 = \frac{t}{MTTF_1} = \frac{4,704}{104,964.21} = 0.0448$$

El costo parcial anual de un componente es el costo de ese componente por año y se puede estimar mediante la Ecuación 4.12:

$$C_{pc1} = FF_1 \times C_1 \quad (\text{Ecuación 4.12})$$

Por lo tanto, el costo parcial de los tubos de humo es:

$$C_{pc1} = 0.0448 \times \$25,000 = \$1,120.38$$

Se asume un costo logístico de repuesto del componente es el 15% del costo del componente por año.

El coste logístico adicional del tubo de humo es:

$$C_{log1} = 0.15 \times C_{pc1}$$

$$C_{log1} = 0.15 \times \$1,120.38 = \$168.06$$

El costo de la pérdida de producción del componente se estima considerando la pérdida de las líneas de producción que dependen de la generación de vapor de la planta como \$681 por hora. Por lo tanto, el costo de pérdida de producción del componente se estima multiplicando FF, MTTR y la pérdida de producción de la planta por hora.

$$C_{pp1} = \$681 \times MTTR \times FF_1$$

$$C_{pp1} = \$681 \times 240 \times 0.0448 = 7,324.61$$

El costo de mantenimiento anual de los tubos de humo se estima utilizando la Ecuación 4.10 y es el siguiente:

$$\text{Costo Mantenimiento} = (FF_i \times MTTR_i \times C_{li} \times N^\circ) + C_{pci} + C_{logi} + C_{pp}$$

$$\text{Costo Mantenimiento} = (0.0448 \times 240 \times \$7.79 \times 5) + \$1,120.38 + \$168.06 + \$7,324.61$$

$$\text{Costo Mantenimiento} = \$ 8,613.05$$

Además, el costo total anual del sistema de caldera se puede estimar como la suma del costo de mantenimiento de todos los componentes y está dado por:

$$\sum_{i=1}^{31} \text{Costo Mantenimiento} = \$67,630.15$$

Se realiza un cálculo similar para todos los componentes, tanto para el actual como para el propuesto.

Los resultados se presentan en la Tabla 4.26, y la tabla completa se encuentra en el Anexo I.

Tabla 4.26 Costos de mantenimiento por componente actual y propuesto (Elaboración Propia).

Item	Componente	Costo Mtto. (Actual)	Costo Mtto. (Propuesto)	Item	Componente	Costo Mtto. (Actual)	Costo Mtto. (Propuesto)
1	Cuerpo	\$1,271.67	\$1,128.27	17	Breakers	\$305.22	\$281.79
2	Empaquetadura	\$1,281.26	\$889.69	18	Controlador de quemador	\$489.34	\$456.81
3	Válvula de paso de vapor	\$1,285.50	\$1,118.25	19	Controlador de llama	\$597.50	\$536.88
4	Cuerpo externo	\$2,975.54	\$2,747.41	20	Suministro de energía eléctrica interna	\$460.71	\$414.99
5	Tuberías de alimentación de agua condensada	\$1,493.76	\$968.40	21	Pressuretrol de operación	\$377.81	\$346.34
6	Tubería de purga	\$11,648.19	\$2,353.25	22	Manómetro de presión	\$1,461.41	\$1,129.68
7	Soporte	\$1,161.47	\$1,078.35	23	Manómetro de temperatura	\$1,465.01	\$1,132.59
8	Válvulas de seguridad	\$690.94	\$640.91	24	Válvula de control de gas	\$10,453.19	\$9,226.02
9	Cuerpo interno	\$5,831.28	\$5,202.71	25	Válvula reguladora de aire	\$331.10	\$299.84
10	Quemador	\$9,786.29	\$7,481.15	26	McDonnell	\$983.70	\$916.12
11	Tubos de humo	\$10,076.61	\$8,613.13	27	Ventilador de motor	\$1,209.38	\$1,085.08
12	Cámara de combustión	\$3,513.15	\$3,279.97	28	Empaques de compuertas	\$7,716.76	\$2,574.40
13	Electrodos	\$5,903.16	\$5,267.14	29	Visor de llama	\$1,821.38	\$1,405.83
14	Transformador de ignición	\$998.23	\$867.40	30	Empaques de quemador	\$6,928.54	\$4,741.81
15	Contactador	\$297.31	\$274.11	31	Visor de nivel de agua	\$1,468.60	\$969.43
16	Botonera	\$219.57	\$202.40		Total	94,503.59	67,630.15

Por lo tanto, la diferencia en costos del plan de mantenimiento, calculada como Costo de Mantenimiento Actual menos Costo de Mantenimiento Propuesto, es de \$26,873.44, representando un ahorro. En la Figura 4.7 se presentan los costos por componente, tanto actuales como propuestos.

Esta representación ayuda a identificar y resaltar los componentes más cruciales en términos de costo, así como a enfocarse en aquellos cuyos costos de mantenimiento pueden reducirse fácilmente.

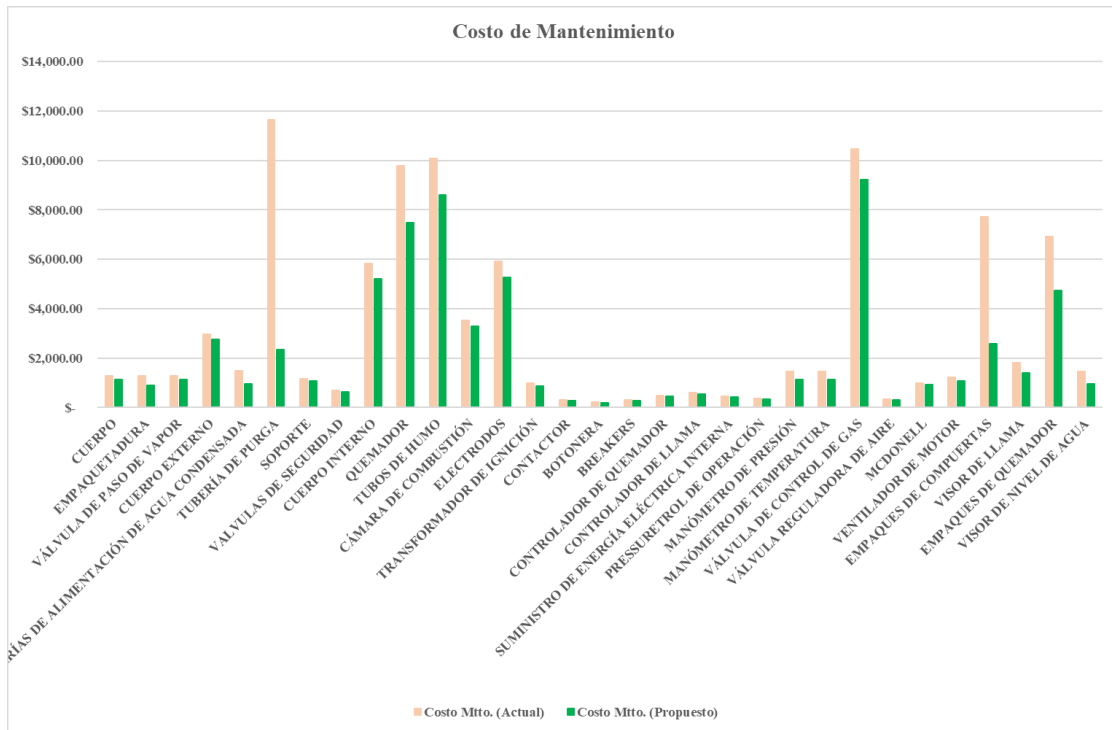


Figura 4.7 Comparación de costes actuales y los costos propuestos de Mantenimiento (Elaboración Propia).

En la Figura 4.8 se representan los costos mensuales, y la tendencia indica que los meses de marzo y septiembre serán los de mayor costo debido a los peritajes obligatorios según la ley nacional.

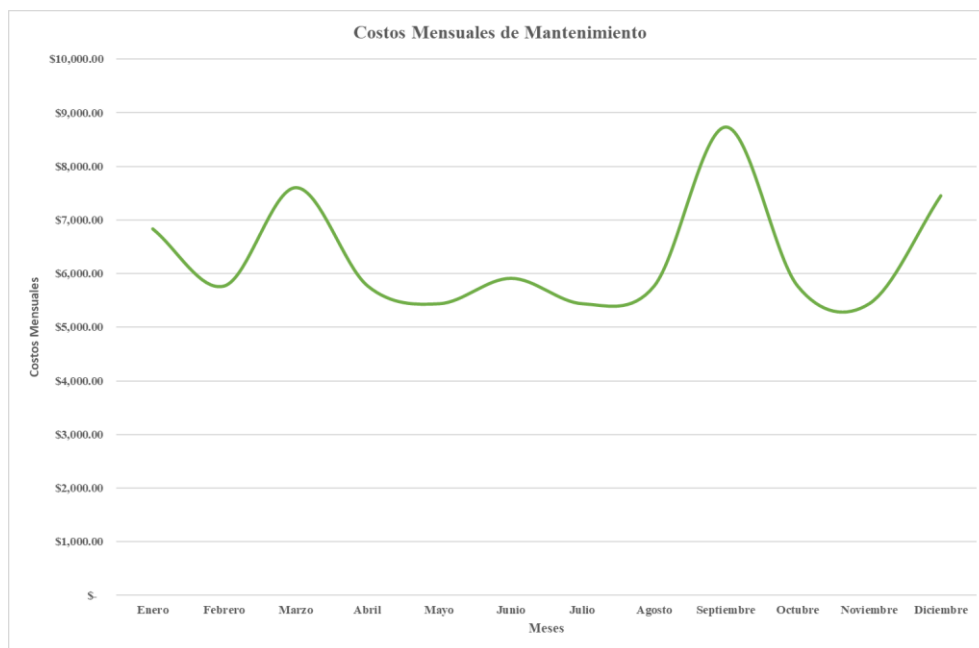


Figura 4.8 Costos Mensuales de mantenimiento (Elaboración Propia).

4.7.3. Reducción de Costos

Con los costos actuales y propuestos, se observa una diferencia de \$26,873.44; sin embargo, es necesario agregar los costos administrativos de diseño del Plan RCM, los Costos de Capacitación y el costo del Software de Mantenimiento. Los resultados se muestran en la Tabla 4.27 y la Figura 4.9, donde se observa la proyección de la reducción de costos de mantenimiento en los próximos cinco años, con un promedio equivalente al 27.54%.

Tabla 4.27 Proyección de costos de Mantenimiento (Elaboración Propia).

Año	Plan Actual	Plan Propuesto	Ahorro	
2024	\$ 94,503.59	104,103.59	9,600.00	-9.22%
2025	\$ 97,338.70	74,459.06	-22,879.64	30.73%
2026	\$ 100,258.86	74,459.06	-25,799.81	34.65%
2027	\$ 103,266.63	74,459.06	-28,807.57	38.69%
2028	\$ 106,364.63	74,459.06	-31,905.57	42.85%
Total	\$ 501,732.41	\$401,939.81	-\$99,792.59	27.54%

Costos		
administrativos de diseño de Plan RCM	\$ 2,800.00	solo el primer año
Costos de Capacitación	\$ 2,000.00	solo el primer año
Costos por Software de Mantenimiento	\$ 4,800.00	\$/año

Nota: En la columna ahorro el signo (-) significa ahorro.

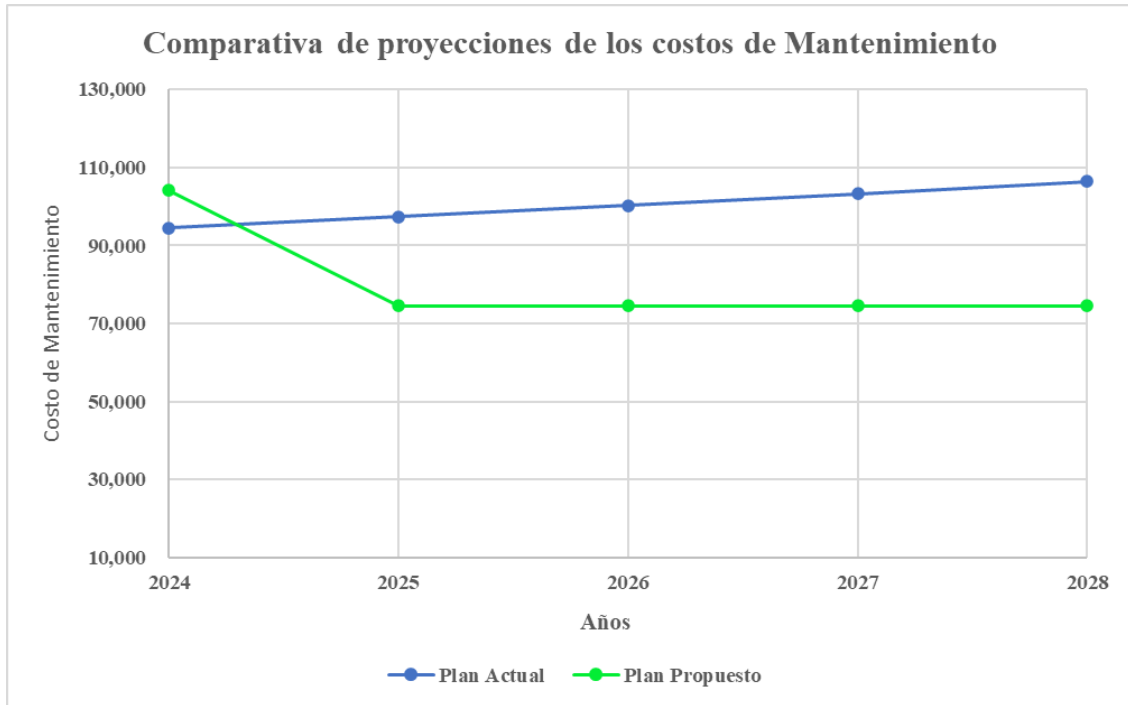


Figura 4.9 Comparativa de proyección de Costos de Mantenimiento (Elaboración Propia).

Con lo desarrollado para la implementación del plan propuesto de RCM en la caldera, se considera que los ahorros se podrán apreciar en un periodo de 12 meses aproximadamente, teniendo en cuenta que el proceso de producción es continuo durante ese periodo.

Con los datos de costos de mantenimiento propuesto y la indisponibilidad propuesta, existe una relación lineal entre estas variables para este sistema, según la Ecuación 4.13. Los cálculos específicos están detallados en el Anexo J.

$$\text{Costos de Mtto.} = 3,595,795.42 \times \text{Indisponibilidad} + 7.145 \quad (\text{Ecuación 4.13})$$

También, con la indisponibilidad, se puede obtener el vapor no generado (Ton / Año) debido a la falla. Además, el tiempo esperado anual fuera de servicio por falla en hr/Año. Los datos se presentan en la Tabla 4.28.

Tabla 4.28 Comparativa de Indisponibilidad y vapor no generado anualmente debido a la falla (Elaboración Propia).

Componente	ACTUAL				PROPUESTO			
	Indisponibilidad (Actual)	Indisponibilidad (Propuesta)	Vapor No Generado (Ton /Año)	Vapor Generado (Ton /Año)	Tiempo esperado anual fuera de servicio por falla hr/año	Vapor No Generado (Ton /Año)	Vapor Generado (Ton /Año)	Tiempo esperado anual fuera de servicio por falla hr/año
Cuerpo	0.000324	0.000305	0.56	1739.44	1.60	0.53	1739.47	1.51
Empaquetadura	0.000324	0.000236	0.56	1739.44	1.60	0.41	1739.59	1.17
Válvula de paso de vapor	0.000347	0.000319	0.60	1739.40	1.71	0.55	1739.45	1.58
Cuerpo externo	0.000808	0.000807	1.41	1738.59	4.00	1.40	1738.60	3.99
Tuberías de alimentación de agua condensada	0.000404	0.000277	0.70	1739.30	2.00	0.48	1739.52	1.37
Tubería de purga	0.003226	0.000689	5.61	1734.39	15.95	1.20	1738.80	3.41
Soporte	0.000324	0.000320	0.56	1739.44	1.60	0.56	1739.44	1.58
Válvulas de seguridad	0.000162	0.000157	0.28	1739.72	0.80	0.27	1739.73	0.78
Cuerpo interno	0.001616	0.001600	2.81	1737.19	7.99	2.78	1737.22	7.91
Quemador	0.001938	0.001556	3.37	1736.63	9.58	2.71	1737.29	7.69
Tubos de humo	0.002421	0.002281	4.21	1735.79	11.97	3.97	1736.03	11.28
Cámara de combustión	0.000970	0.000966	1.69	1738.31	4.80	1.68	1738.32	4.77
Electrodos	0.001616	0.001485	2.81	1737.19	7.99	2.58	1737.42	7.34
Transformador de ignición	0.000270	0.000246	0.47	1739.53	1.33	0.43	1739.57	1.22
Contactador	0.000081	0.000079	0.14	1739.86	0.40	0.14	1739.86	0.39
Botonera	0.000061	0.000059	0.11	1739.89	0.30	0.10	1739.90	0.29
Breakers	0.000081	0.000079	0.14	1739.86	0.40	0.14	1739.86	0.39
Controlador de quemador	0.000101	0.000098	0.18	1739.82	0.50	0.17	1739.83	0.49
Controlador de llama	0.000162	0.000153	0.28	1739.72	0.80	0.27	1739.73	0.76
Suministro de energía eléctrica interna	0.000121	0.000115	0.21	1739.79	0.60	0.20	1739.80	0.57
Pressuretrol de operación	0.000081	0.000077	0.14	1739.86	0.40	0.13	1739.87	0.38

Manómetro de presión	0.000404	0.000329	0.70	1739.30	2.00	0.57	1739.43	1.62
Manómetro de temperatura	0.000404	0.000329	0.70	1739.30	2.00	0.57	1739.43	1.62
Válvula de control de gas	0.002904	0.002749	5.05	1734.95	14.36	4.78	1735.22	13.59
Válvula reguladora de aire	0.000081	0.000077	0.14	1739.86	0.40	0.13	1739.87	0.38
McDonnell	0.000243	0.000239	0.42	1739.58	1.20	0.42	1739.58	1.18
Ventilador de motor	0.000324	0.000306	0.56	1739.44	1.60	0.53	1739.47	1.51
Empaques de compuertas	0.002019	0.000710	3.51	1736.49	9.98	1.24	1738.76	3.51
Visor de llama	0.000505	0.000411	0.88	1739.12	2.50	0.71	1739.29	2.03
Empaques de quemador	0.001938	0.001416	3.37	1736.63	9.58	2.46	1737.54	7.00
Visor de nivel de agua	0.000404	0.000277	0.70	1739.30	2.00	0.48	1739.52	1.37

4.8. Plan de implementación de la propuesta

La implementación de cualquier proyecto requiere una planificación detallada y estructurada. Es importante identificar las fases para asignar recursos adecuados y definir plazos realistas. Se toma de ayuda de un estudio previo de Auditoria AMORMS (*ASSET MANAGEMENT, OPERATIONAL RELIABILITY AND MAINTENANCE SURVEY*) a la empresa textil (Anexo K), que facilita el diagnostico actual de la empresa como una herramienta para estructurar de la mejor manera la implementación, el cual se muestra en la Figura 4.10.

1. Reunión para presentación del proyecto con la gerencia general y de mantenimiento para su aprobación.
2. Selección del equipo multidisciplinario para implementar el RCM de la caldera.
3. Capacitación RCM (Equipo multidisciplinario).
4. Capacitación RCM (Personal de operación y mantenimiento de caldera).
5. Reunión de seguimiento equipo RCM.
6. Creación de módulos para el software de control de mantenimiento (equipo RCM e IT).
 - a. Evaluación e implementación de indicadores relacionados con costos de mantenimiento, MTTF y MTTR.
 - b. Implementación de dispositivos para el registro de horas de operación y de mantenimiento.

- c. Realización de formatos de registro de fallas y base de datos para almacenar y clasificar información específica para indicadores.
7. Prueba piloto de plan RCM en calderas.
 8. Retroalimentación y modificaciones en módulos y plan en los cuales se encuentre problemas o que se descubra incompatibilidades con los módulos preestablecidos.
 9. Seguimiento en modificaciones de módulos RCM.

4.9. Riesgo Operacional

El plan de Mantenimiento RCM se basa en el análisis de la criticidad de los equipos, lo que lo convierte en un enfoque directo para abordar posibles fallas en función de su probabilidad de ocurrencia. Los resultados del AMFEC, junto con la frecuencia y la naturaleza de las acciones de mantenimiento, desempeñan un papel crucial en fortalecer la robustez del sistema. Esta fortaleza se traduce en la capacidad para prevenir las consecuencias de una posible falla catastrófica en la planta. Evaluar los resultados de una falla, especialmente si es de naturaleza catastrófica, constituye un desafío, ya que implica considerar múltiples variables. En este contexto, se busca establecer una perspectiva que contextualice los posibles costos asociados a una falla grave, particularmente aquella que resulta en daños a la infraestructura y pérdida de vidas humanas. Existen numerosos ejemplos de explosiones de calderas debido al bajo nivel de agua, y es práctica común en ingeniería investigar y analizar estos accidentes. Datos estadísticos publicados por el National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors indican que el 85% de los accidentes se atribuyen a dos causas principales: bajo nivel de agua (49%) y error en la operación o mantenimiento deficiente (36%) (Morales-Vargas, 2020). Es recomendable estimar posibles multas y sanciones, especialmente en temas de seguridad y reparación de daños a terceros, que pueden considerarse como costos indirectos. Estos costos pueden variar dependiendo de la gravedad de la infracción, pero en casos muy graves, las multas pueden oscilar entre 22 y 28 salarios mínimos, afectando significativamente el desarrollo empresarial a largo plazo (Ministerio de Trabajo y Previsión Social, 2010a).

Conclusiones Parciales

En este capítulo, se presentan resultados que orientan la priorización del mantenimiento de sistemas críticos en el proceso de producción, considerando su importancia según criterios expertos. Este enfoque RCM, respaldado por la robustez de las ponderaciones utilizadas, establece pautas para la gestión de calderas, destacando la necesidad de adherirse a protocolos de seguridad y mantenimiento. Dada la función crucial de la caldera en la producción y su impacto potencial en la planta, el análisis propone una base sólida para la priorización de actividades de mantenimiento y operación. La metodología RCM empleada ha demostrado ser eficaz al asignar tareas específicas para reducir fallas y mejorar la confiabilidad, con intervalos recomendados para el mantenimiento preventivo. La comparación entre el plan actual y el propuesto revela un aumento del 16.15% en la confiabilidad, destacando la efectividad de las tareas de mantenimiento en componentes críticos. Se prevé un aumento en la disponibilidad del equipo, disminuyendo eventos que pongan en riesgo la integridad y los intereses de la empresa. Esta información guiará a la empresa en la toma de decisiones sobre la integración de propuestas y actividades en el plan de mantenimiento.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Mediante la revisión de investigaciones vinculadas al mantenimiento de sistemas de generación de vapor, se logró identificar y describir diversos enfoques empleados en la industria textil. De estos, se seleccionó la metodología RCM para su implementación. Esta elección se respalda en su capacidad para optimizar los recursos disponibles en el departamento de mantenimiento mediante un análisis de confiabilidad. Dicha metodología está orientada a preservar la funcionalidad de las calderas, las cuales desempeñan un importante rol en la producción, seguridad ocupacional, salud y protección del medio ambiente.
- La evaluación en un grupo multidisciplinario, a través del análisis de las consecuencias vinculadas a fallos e integrada en la matriz AMFEC, permitió una valoración exhaustiva del impacto de un modo de fallo en un componente. Esta metodología garantiza una evaluación más fiable al tener en cuenta diversas perspectivas, lo que a su vez facilita una asignación de tareas de mantenimiento más integral y eficiente. Este trabajo supera las limitaciones del modelo clásico de evaluación de mantenimiento al proporcionar un análisis cuantitativo detallado y una determinación precisa de los costos asociados al mantenimiento.
- El plan de mantenimiento propuesto destaca su viabilidad económica al lograr un ahorro promedio del 27.54%, en comparación con los costos asociados al plan de mantenimiento vigente. Adicionalmente, se logrará un aumento en la confiabilidad del sistema al resaltar la importancia del análisis de confiabilidad. Este análisis ayuda a los ingenieros a implementar un mantenimiento preventivo adecuado, permitiéndoles desarrollar una metodología para determinar el momento óptimo para el mantenimiento y los costos asociados. Estos enfoques pueden ser extrapolados y aplicados a otros sistemas dentro de la industria textil.

5.2. Recomendaciones

- Entrenar al personal de mantenimiento para que conozca las herramientas del mantenimiento basado en confiabilidad y cómo se implementa.
- Compartir los indicadores de mantenimiento del área de calderas con el personal de mantenimiento involucrado.
- Implementar el bechmarking como herramienta de comparación para la aplicación de las mejores prácticas de la industria, estableciendo metas con base en hechos y replicando los métodos de trabajo de otras empresas que lo están realizando de mejor manera.

REFERENCIAS

- Acuña, J. A. (2003). *Ingeniería de confiabilidad* (Vol. 1). Editorial Tecnológica de CR.
- Aguilar, A. F., Andrade, J. R., de Ramirez, S. P., Rodriguez, M., Cabrera, O., Lara, C. F., Castaneda, W., Figueroa, C., de Urrutia, A. G., Reyes, J. L. C., & Hernandez, A. C. (2002). *Emisiones atmosféricas fuentes fijas puntuales*.
- Alebrant Mendes, A., & Duarte Ribeiro, J. L. (2014). Establishment of a maintenance plan based on quantitative analysis in the context of RCM in a JIT production scenario. *Reliability Engineering & System Safety*, 127, 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.res.2014.03.004>
- Alrifayy, M., Sai Hong, T., As' array, A., Elianddy Supeni, E., & Ang, C. K. (2020). Optimization and selection of maintenance policies in an electrical gas turbine generator based on the hybrid reliability-centered maintenance (RCM) model. *Processes*, 8(6), 670.
- Argueta, F. Y. S. (2023). El Salvador, Situación Ambiental, Adaptación del cambio climático desafíos y retos socio-comunitarios. *Revista Con-Secuencias*, 97-128.
- Bahamondes, P. A. (2006). Descripción de calderas y generadores de vapor. *Asociación Chilena de Seguridad, Santiago*.
- Basu, P., Kefa, C., & Jestin, L. (2012). *Boilers and Burners: Design and Theory*. Springer Science & Business Media.
- Behzad, M., Kim, H., Behzad, M., & Asghari Behambari, H. (2019). Improving sustainability performance of heating facilities in a central boiler room by condition-based maintenance. *Journal of Cleaner Production*, 206, 713-723. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.221>
- Betancor González, A. (2018). *Plan de mantenimiento de un sistema de calderas basado en la medición de la corrosión*.
- Bewoor, A. K., & Patil, R. B. (2021). *Availability Analysis of a Steam Boiler in Textile Process Industries Using Failure and Repair Data: A Case Study*.

- Campos-López, O., Tolentino-Eslava, G., Toledo-Velázquez, M., & Tolentino-Eslava, R. (2019). *Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos* (Científica, 23(1), 51-59.).
- Campos-López, O., Tolentino-Eslava, G., Toledo-Velázquez, M., & Tolentino-Eslava, R. (2019). Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos. *Científica*, 23(1), 51-59.
- Chen, Y., & Zhang, T. (2012). *Application & development of Reliability-centered Maintenance (RCM) in China's nuclear energy field*. 543-548.
- Chiquillo Rodríguez, R. A., Fernández González, C. A., & Ramos Henríquez, E. M. (2021). *Desarrollo de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad e índices de eficiencia energética para el proceso de turbogeneración en la industria azucarera*.
- CONAMYPE. (2022, diciembre). *Análisis de Mercado del Sector Textil en El Salvador*. <https://www.conamype.gob.sv/download/analisis-de-mercado-del-sector-textil-en-el-salvador/>
- Consejo Nacional de Energía. (2014). *Inventario y caracterización de calderas en El Salvador*.
- Díaz-Concepción, A., Villar-Ledo, L., Cabrera-Gómez, J., Gil-Henríquez, A. S., Mata-Alonzo, R., & Rodríguez-Piñero, A. J. (2016). Implementación del Mantenimiento Centrado en la confiabilidad en empresas de transmisión eléctrica. *Ingeniería Mecánica*, 19(3), 137-142.
- Faragalla, M. M., Emmanuel, E., Alhamadi, I., Awwal, A. M., & Yong-Kwan, L. (2016). *Reliability Centered Maintenance (RCM) Methodology and Application to the Shutdown Cooling System for APR-1400 Reactors*.
- Flores Claros, S., & Chávez Posada, Y. A. (2021). *Diseño e implementación de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para una caldera bagacera*.

- Fuzi, N. F. A., Alnaimi, F. B. I., & Nasif, M. S. (2020). Intelligent risk-based maintenance approach for steam boilers: Real case. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 28, 69-81.
- Ganapathy, V. (2002). *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design, Applications, and Calculations*. CRC Press.
- Gardella González, M. (2011). Mejora de metodología RCM a partir del AMFEC e implantación de mantenimiento preventivo y predictivo en plantas de procesos [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. En *Riunet*. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/9686>
- Guil Bozal, M. (2006). Escala mixta likert-thurstone. *Anduli*, 5, 81-95.
- IB&M Boilers. (2023). *Calderas industriales y mecánica: Calderas industriales nuevas y usadas, alquiler de calderas, reparación de calderas*. <https://industrialboiler.com/>
- Islam H., A. (2010). Reliability-Centered Maintenance Methodology and Application: A Case Study. *Engineering*, 2010. <https://doi.org/10.4236/eng.2010.211109>
- ISO. (2016). *ISO 14224:2016*. ISO. <https://www.iso.org/standard/64076.html>
- ITCL. (2020, agosto 6). Hacia el mantenimiento 4.0. Casos de éxito de ITCL. *ITCL*. <https://itcl.es/blog/hacia-el-mantenimiento-40/>
- Jagtap, H. P., & Bewoor, A. K. (2017). Use of Analytic Hierarchy Process Methodology for Criticality Analysis of Thermal Power Plant Equipments. *Materials Today: Proceedings*, 4(2, Part A), 1927-1936. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.038>
- Jaramillo, M. C., LOPERA, C., Manotas, E. C., & Yanez, S. (2008). Generation of Weibull Bivariate Dependent Failure Times Using Copulas. *Revista Colombiana de Estadística*, 31(2), 169-181.
- Jardine, A. K., & Tsang, A. H. (2005). *Maintenance, replacement, and reliability: Theory and applications*. CRC press.
- Kiran, M. (2021, marzo 7). *Reliability Centered Maintenance of Circular Loom*. Proceedings of the International Conference on, India.

- Kohan, A. (2000). *Combustión, quemadores, controles y sistemas de seguridad de llama. Proceso básico de combustión. En A. Kohan, Manual de calderas: Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas (págs. 409-474).*
- Linero, D. L. (2010). *Elementos de la mecánica del medio continuo para cuerpos sólidos.* Univ. Nacional de Colombia.
- López Mendoza, E. (2020, noviembre 26). Partes de una Caldera. Componentes y Elementos Principales | Euroair. *Euroair Blog*. <https://www.euroair.es/blog/partes-de-una-caldera/>
- Ministerio de Trabajo y Previsión Social. (2010a). *Ley General de Prevención de Riesgos en los Lugares de Trabajo*. <https://www.mtps.gob.sv/download/ley-general-de-prevencion-de-riesgos-en-los-lugares-de-trabajo-2/>
- Ministerio de Trabajo y Previsión Social. (2010b). Decreto No.254 Ley General de Pevisión de Riesgos en los Lugares de Tabajo. *MINISTERIO DE TRABAJO Y PREVISIÓN SOCIAL*. <https://www.mtps.gob.sv/download/decreto-no-254-ley-general-de-pevision-de-riesgos-en-los-lugares-de-tabajo/>
- Mojicar-Caballero, S. (2016). Análisis de fallos: El caso de calderas pirotubulares y su impacto ambiental. *Ciencia en su PC*, 2, 34-43.
- Morales-Vargas, R. A. (2020). Simulación numérica de explosiones en calderas: Pautas para la distribución de planta como medida de mitigación de daños. *Revista de Salud Ambiental*, 20(2), 137-149.
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento centrado en confiabilidad*. Aladon Ltda.
- Olazo Quispe, R. C. (2017). Propuesta de mejora de mantenimiento utilizando RCM en la línea de producción de xantato de la industria química. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/622657>

- Oreda, C. (2002). *OREDA-Offshore Reliability Data Handbook*. Norway: OREDA Participants.
- Órgano Legislativo. (2012). *Decreto N° 87 Reglamento para la Verificación del Funcionamiento y Mantenimiento de Generadores de Vapor*.
- Ortiz, F. G. (2011). Modeling of fire-tube boilers. *Applied Thermal Engineering*, 31(16), 3463-3478.
- Palmer, R. D. (2013). *Maintenance planning and scheduling handbook*. McGraw-Hill Education.
- Parra, C., & Crespo Marquez, A. (2019). *Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21197.87524>
- Patil, S. S., & Bewoor, A. K. (2020). Reliability analysis of a steam boiler system by expert judgment method and best-fit failure model method: A new approach. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 38(1), 389-409. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-01-2020-0023>
- Patil, S. S., Bewoor, A. K., Kumar, R., Ahmadi, M. H., Sharifpur, M., & PraveenKumar, S. (2022). Development of Optimized Maintenance Program for a Steam Boiler System Using Reliability-Centered Maintenance Approach. *Sustainability*, 14(16), Article 16.
<https://doi.org/10.3390/su141610073>
- Piechnicki, F., Santos, C., Loures, E., & Santos, E. (2019). RCM deployment analysis in fiber wood production: Improving the productivity and increasing the system reliability. *Independent Journal of Management & Production*, 10(6), 2148-2168.
- Prasmoro, A. V. (2020). Analisa sistem perawatan pada mesin las MIG dengan metode Failure Mode and Effect Analysis: Studi kasus di PT. TE. *Jurnal Operations Excellence: Journal of Applied Industrial Engineering*, 12(1), 13-27.
- Rayaprolu, K. (2009). *Boilers for Power and Process*. CRC Press.
- Rizkya, I., Siregar, I., Siregar, K., Matondang, R., & Henri, E. W. (2019). *Reliability Centered Maintenance to Determine Priority of Machine Damage Mode*. 125, 22005.

- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
- Sabet, M. (2016). *Industrial Steam Systems: Fundamentals and Best Design Practices*. CRC Press.
- SAE. (2009). *JA1011_200908: Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes—SAE International*. https://www.sae.org/standards/content/ja1011_200908/
- Sharma, R. K., Kumar, D., & Kumar, P. (2005). FLM to select suitable maintenance strategy in process industries using MISO model. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 11(4), 359-374. <https://doi.org/10.1108/13552510510626981>
- Singh, C. (2023). *Boiler Operation Engineer Exam, Interview Q&A, Terminology, and Boiler Overview*. <https://www.scribd.com/book/638298907/Boiler-Operation-Engineer-Exam-Interview-Q-A-Terminology-and-Boiler-Overview>
- Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2003). *RCM--Gateway to world class maintenance*. Elsevier.
- Teknomo, K. (2012). Analytic hierarchy process (AHP) tutorial. *Revoledu. com*, 6(4), 1-20.
- UNEP. (2004). *Cleaner Production & Energy Efficiency Manual* (1.^a ed.). <https://dokumen.tips/documents/cleaner-production-energy-efficiency-manual.html>
- Universidad Nacional de Tucumán. (2015). *CENTRALES TÉRMICAS DE VAPOR CICLO DE RANKINE*. https://catedras.facet.unt.edu.ar/centraleselectricas/wp-content/uploads/sites/19/2014/10/TP-3-Ciclo-de-Rankine_2015.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency. (2016). *Guía para el Control de la Humedad en el Diseño, Construcción y Mantenimiento de Edificaciones*. https://espanol.epa.gov/sites/default/files/2016-07/documents/moisture_control_guidance_spanish_april_2016_508_final.pdf

- Wang, L., Chu, J., & Wu, J. (2007). Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, *107*(1), 151-163.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.08.005>
- Yañez, M., Semeco, K., & Medina, N. (2005). Enfoque Práctico para la Estimación de Confiabilidad y Disponibilidad de Equipos, con base en Datos Genéricos y Opinión de Expertos. *Universidad Simón Bolívar-Venezuela*.
- Zeinalnezhad, M., Chofreh, A. G., Goni, F. A., & Klemeš, J. J. (2020). Critical success factors of the reliability-centred maintenance implementation in the oil and gas industry. *Symmetry*, *12*(10), 1585.

ANEXO A INFORME PERICIAL Y CONSTANCIA DE FUNCIONAMIENTO DE GENERADORES DE CALOR (CALDERAS)

MINISTERIO DE TRABAJO Y PREVISIÓN SOCIAL
DIRECCION GENERAL DE PREVISIÓN SOCIAL
SAN SALVADOR, EL SALVADOR, C.A.



INFORME PERICIAL Y CONSTANCIA DE FUNCIONAMIENTO DE GENERADORES DE VAPOR (CALDERAS)

LDENOMINACIÓN DE LA EMPRESA

Fecha de Peritaje: _____ **N° MTPS:** _____

LUGAR DE TRABAJO:	GIRO: Fabricación de Prendas de Vestir	CIU:
DIRECCIÓN:	NIT:	
RESPONSABLE:	TELEFONO:	E Mail:
PERITO:	TELEFONO:	E Mail:

II. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

MARCA:	TIPO DE COMBUSTIBLE:
MODELO:	PRESIÓN DE DISEÑO:
SERIE: Ntl Board	PRESIÓN DE OPERACIÓN:
TIPO:	ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS:
FECHA DE FABRICACIÓN:	VOLTAJE DE CIRCUITO PRINCIPAL:
FECHA DE INSTALACIÓN:	VOLTAJE DE CIRCUITO DE CONTROL:
CAPACIDAD (HP,lbs x hora,BTU x hora):	CAPACIDAD VALVULAS DE SEGURIDAD: Lb/hr

III. RESULTADOS DEL PERITAJE EN FRIO

	B- BUENO		M- MALO	
	B	M	B	M
CUERPO DE CALDERA				
PRUEBA HIDROSTÁTICA: PRESIÓN:				
PRUEBA DE VALVULAS DE SEGURIDAD:				
REVISIÓN DE CONDICIONES INTERNAS				
INCORUSIONES- CORROSION EN EL CUERPO:				
COLUMNA DE AGUA:				
PLACA DIFUSORA DE ENTRADA DE AGUA:				
CONDICIÓN DE REGISTROS (TORTUGAS, ETC.):				
CONDICIONES GENERALES:				
ESTADO DE TUBOS DE CALFACCIÓN:				
ESTADO DE PLACAS DEL CUERPO (ESPECIOS DOMOS):				
ESTADO DE SOLDADURAS EN EL CUERPO:				
ESTADO DE COMPUERTAS:				
ESTADO DE REFRACTARIOS:				
ESTADO DE LIMPIEZA DE LA CALDERA:				
ESTADO DE SOPORTERÍA Y BAGES DE CALDERA:				

IV. RESULTADOS DEL PERITAJE DE FUNCIONAMIENTO EN OPERACIÓN (SEMESTRAL)

	B		M	
	B	M	B	M
SISTEMAS DE SEGURIDAD				
PRUEBA DE PARI DE VALVULAS DE SEGURIDAD:				
PRUEBA DE DESCONEXIÓN BAJO NIVEL VISIBLE:				
CONTROLES DE NIVEL DE AGUA:				
ARRANQUE Y PARI DE ALIMENTACIÓN DE AGUA:				
SISTEMA DE ALARMA (TIPO):				
SECURIDAD DE PROGRAMADOR (PREPURGA etc):				
PRUEBA DE FALLA DE LLAMA:				
ESTADO DE FOTOGELDA:				
COMPORTAMIENTO DE LA COMBUSTIÓN:				
CONDICIÓN GENERAL DE SISTEMA ELÉCTRICO:				
SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE:				
FUGAS DE COMBUSTIBLE Ó GAS:				
TANQUES DE COMBUSTIBLE Y DE GAS:				
VENTOS ARIOS: TANQUE DE CONDENSADOS:				
CONDICIONES GENERALES DE ACCESORIOS				
TANQUE DE CONDENSADOS:				
TEMPERATURA DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN:				
CHIMENEA:				
FUNCIONAMIENTO DE VALVULAS:				
ANCLAJE DE TUBERIAS:				
PURGAS:				
ESTADO DE TUBERÍAS DE VAPOR:				
ESTADO DE AISLAMIENTO DE TUBERIAS:				
UBICACIÓN Y ESTADO DE TERMÓMETROS:				
UBICACIÓN Y ESTADO DE MANÓMETROS:				
FUGAS DE VAPOR, AGUA U OTROS:				
ESTADO DE AISLAMIENTO TÉRMICO DE LA CALDERA:				
FOSA, TANQUE O SEPARADOR DE PURGAS:				
CONDICIONES DEL CLARRO DE CALDERAS:				

IP-SSO-EC-0714

V. RECOMENDACIONES GENERALES :

VI. RECOMENDACIONES SOBRE EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO:

VII. ORDENES DE REPARACIÓN:

VIII. FECHA DE PROXIMO PERITAJE: _____ EN OPERACIÓN () _____ EN FRIO Y EN OPERACIÓN () _____

Firma de Perito Autorizado

Sello

El Jefe del Departamento de Seguridad e Higiene Ocupacional, de La Dirección General de Previsión Social del Ministerio de Trabajo y Previsión Social, Hace Constar que:

ESTA AUTORIZADO POR EL MINISTERIO DE TRABAJO Y PREVISIÓN SOCIAL, para la Verificación del funcionamiento de GENERADORES DE VAPOR Y EQUIPOS SUJETOS A PRESIÓN en los Lugares de Trabajo y que ha recibido el Presente Informe para su respectivo análisis.

USO EXCLUSIVO DEL DEPARTAMENTO DE SEGURIDAD E HIGIENE OCUPACIONAL

San Salvador,		
Revisado por:	Autorizado Por:	
_____	Firma de quien retira Informe	_____
Firma y Sello Técnico Sección Seguridad Ocupacional	Fecha:	Firma y Sello Jefe de Departamento de Seguridad e Higiene Ocupacional

IP-SSO-EC-0714

ANEXO B BITACORA DE MEDICIONES CALDERAS

Bitácora de Mediciones Calderas

Día: _____ Técnico: _____ Firma: _____

Caldera en funcionamiento #: _____ **Turno Diurno**

TANQUE DE GAS				
	Presión	Volumen	Temperatura de tanque principal	Presión después válvula reguladora 1ra etapa
Hora	55 - 200 Psi	30 - 85%	5 - 45°C	15 - 22 Psi
11:00 a. m.				

CALDERAS							
Hora	Presión de gas antes de válvula reguladora 2da etapa	Presión de gas después de válvula reguladora 2da etapa	Presión de vapor generado	Temperatura de gases de combustión en chimenea	Tipo de fuego en el quemador	Temperatura de agua tanque de condensado	Presión de alimentación de agua a calderas
7:00 a. m.	15 - 22 Psi	5 - 20°H2O	80 - 115 Psi	400 - 450 °F	Alto/Medio	40 - 100°C	80 - 130 Psi
11:00 a. m.							
3:00 p. m.							

Hora	Nivel en tanque de condensado	Nivel de agua en la caldera	Cantidad de vapor generado	Cantidad de GLP consumido/fase gas	Dureza (calderas)	TSD (calderas)	TSD (tanque Condesado)
7:00 a. m.	35 - 70 %	80 - 100 %	Kg	Kg	0 - 3ppm	0 - 3000ppm	0 - 500ppm
11:00 a. m.						11:00 a.m.	
3:00 p. m.							

SUAVIZADORES							
Hora	Nivel de cisterna de agua dura	Concentración de salmuera	Presión de agua entrada a suavizador	Agua pendiente de servir en suavizado	Dureza - agua en la salida del suavizador	Dureza - Agua en el proceso	Pendiente a suavizar (al finalizar)
7:00 a. m.	70 - 100%	80 - 100%	30 - 80Psi	Gal	0 - 3ppm	0 - 3ppm	Gal
11:00 a. m.							
3:00 p. m.							

REVISIONES GENERALES	
Inspección visual de válvulas de seguridad	
Funcionamiento de bombas de agua suavizada	
Fugas de vapor	
Fugas de agua en tuberías	
Fugas de GLP	
Válvulas	

PURGAS DE CALDERA	
07:00 AM	
09:00 AM	
11:00 AM	
01:00 PM	
03:00 PM	
05:00 PM	
10 Segundos de Duración	

CONSUMO DE QUIMICOS		
Químico	Cantidad	Unidad
Sal		
Anti-corrosivo A-310		
Anti-Incrustante A-245		
Secuestrante de Oxígeno AB-125L		

Buen estado
 Mal estado

Revisado por: _____
 Firma: _____
 Fecha: _____

Observaciones:

FORMATO DE INSPECCIÓN DE CALDERAS EFICIENCIA ENERGÉTICA

Datos de la instalación

Titular	Dirección	
<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	
Localidad	Provincia	Cód. Postal
<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>
Persona de contacto	Teléfono	Zona Climática
<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>

Datos del generador de calor 1

Marca Caldera	Modelo Caldera	Año construc.	
<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	
Marca Quemador	Modelo Quemador	Año construc.	
<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	
Potencia nominal caldera (kW)	Potencia útil caldera (kW)	Potencia máx. quemador (kW)	Potencia mín. quemador (kW)
<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>
Tipo de caldera		Combustible	
<input type="checkbox"/> Estándar <input type="checkbox"/> Baja temp. <input type="checkbox"/> Condensación		<input type="checkbox"/> Gas natural <input type="checkbox"/> GLP <input type="checkbox"/> Gasóleo <input type="checkbox"/> Carbón <input style="width: 50px;" type="text"/> Otro	

Rendimiento del generador de calor 1

CO ₂ (%)	<input style="width: 95%;" type="text"/>			Cumple	<input type="checkbox"/> Sí
CO (ppm)	<input style="width: 95%;" type="text"/>				<input type="checkbox"/> No
Índice Bacharach	<input style="width: 95%;" type="text"/>				Rendimiento energético (%) <input style="width: 50px;" type="text"/>

Datos del generador de calor 2

Marca Caldera	Modelo Caldera	Año construc.	
<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	
Marca Quemador	Modelo Quemador	Año construc.	
<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	
Potencia nominal caldera (kW)	Potencia útil caldera (kW)	Potencia máx. quemador (kW)	Potencia mín. quemador (kW)
<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>	<input style="width: 95%;" type="text"/>
Tipo de caldera		Combustible	
<input type="checkbox"/> Estándar <input type="checkbox"/> Baja temp. <input type="checkbox"/> Condensación		<input type="checkbox"/> Gas natural <input type="checkbox"/> GLP <input type="checkbox"/> Gasóleo <input type="checkbox"/> Carbón <input style="width: 50px;" type="text"/> Otro	

Rendimiento del generador de calor 2

CO ₂ (%)	<input style="width: 95%;" type="text"/>			Cumple	<input type="checkbox"/> Sí
CO (ppm)	<input style="width: 95%;" type="text"/>				<input type="checkbox"/> No
Índice Bacharach	<input style="width: 95%;" type="text"/>				Rendimiento energético (%) <input style="width: 50px;" type="text"/>

Aislamiento tuberías

<input type="checkbox"/> Revisión de todos los tramos visibles de tuberías y equipos en sala de máquinas	Cumple
	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No

Mantenimiento

<input type="checkbox"/> Revisión de Partes y/o Libro de Mantenimiento	Cumple
	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No

Datos de Inspección

Realizada por	Fecha inspección	Cumple	
Empresa	Fecha anterior insp.		<input type="checkbox"/> Sí
	Período analizado		<input type="checkbox"/> No

Datos de la instalación

Titular		Dirección	
Localidad		Provincia	Cód. Postal
Persona de contacto	Teléfono	Zona Climát.	

Datos del generador de calor

Marca Caldera	Modelo Caldera	Año construc.
Marca Quemador	Modelo Quemador	Año construc.
Pot. medida caldera (kW)	Pot. nominal caldera (kW)	Pot. máx. quemador (kW)
Pot. mín. quemador (kW)	Falta Placa Caract.	
Combustible: <input type="checkbox"/> Gas Natural <input type="checkbox"/> GLP <input type="checkbox"/> Gasóleo <input type="checkbox"/> Fuel <input type="checkbox"/> Carbón <input type="checkbox"/> Otro		Sí <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>

Ratio anual energía consumida por superficie calefactada

Energía nom. consumida (kWh)	<input type="checkbox"/> Cal. <input type="checkbox"/> Cal. + ACS <input type="checkbox"/> Cal. + ACS + Cocina	Cumple <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
Superficie útil calefactada (m ²)	Ratio (kWh/m ²)	
Potencia Radiadores (INDIV), Kw	Valor máx.	

Rendimiento del generador de calor

Rend. Simul. Datos IDAE	Instalaciones con contador energía térmica	Cumple <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
Rend. Simul. Alternativo		
Fórmula de cálculo:	E. térmica útil Caldera 1 (kW)	Cumple <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Rendimiento combustión (%)	E. térmica útil Caldera 2 (kW)	
Horas funcionamiento (HF)	E. térmica útil Caldera 3 (kW)	
Pot. med. real produc. (kW)	Suma Total E. Útil (kW)	
Coefic. Operación (Co)	Rendimiento global del generador de calor (%) <input type="text"/> ≥ 60%	

Regulación y Control

Instalación Individual <input type="checkbox"/> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Termostato de ambiente <input type="checkbox"/> Termostato regul. caldera <input type="checkbox"/> Termostato segur. caldera <input type="checkbox"/> Termómetro impul. caldera <input type="checkbox"/> Reg. Modul. quemador <input type="checkbox"/> Ajuste nec. Térmicas 	Instalación Colectiva <input type="checkbox"/> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Regul. función temp. exterior <input type="checkbox"/> Termostato regul. caldera <input type="checkbox"/> Termostato por cada llama <input type="checkbox"/> Regul. modul. quemador <input type="checkbox"/> Termostato segur. caldera <input type="checkbox"/> Termómetro impul. caldera <input type="checkbox"/> Termómetro retorno caldera 	Instalación Colectiva por anillos <input type="checkbox"/> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Termostato ambiente en viv. <input type="checkbox"/> Sistema individ. del gasto 	Instalación Colectiva (ACS) <input type="checkbox"/> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Termostato regul. ACS <input type="checkbox"/> Termómetro ACS <input type="checkbox"/> Contadores ACS en viv. 	Cumple <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
--	--	---	--	--

Aislamiento tuberías

<input type="checkbox"/> Aplicable <input type="checkbox"/> No Aplicable	Cumple <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
<input type="checkbox"/> Revisión de todos los tramos visibles de tuberías que discurren por locales no calefactados	Cumple <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No

Mantenimiento

<input type="checkbox"/> Certificados revisión anual (Individual)	Cumple <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
<input type="checkbox"/> Revisión de Partes y/o Libro de Mantenimiento	

Datos de Inspección

Realizada por	Fecha inspección	Cumple <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
Empresa	Fecha anterior insp.	
	Período analizado	

ANEXO C ENCUESTA

ENCUESTA PARA IDENTIFICAR FALLOS FUNCIONALES EN UNA CALDERA PIROTUBULAR

Instrucciones: Por favor, responda las siguientes preguntas de manera detallada y objetiva. Su retroalimentación es esencial para identificar fallos funcionales y tomar medidas preventivas y correctivas.

Información General:

1. Nombre: _____

2. Cargo o función en la empresa: _____

3. ¿Ha experimentado fallos o problemas en la columna de la caldera? Sí No

4. Describa el fallo o problemas más común en la columna: _____

5. Podría calificar los siguientes fallos, siendo 5 muy frecuente y 1 nada frecuente:

No mantiene el vapor a alta presión	
Fallo en sellado entre componentes	
No hay control del flujo de vapor	

6. ¿Ha experimentado fallos o problemas en los equipos externos relacionados con la caldera? Sí No

7. Por favor, mencione los equipos externos que han presentados fallos y describa los problemas asociados:

1.	4.
2.	5.
3.	6.

8. ¿Ha experimentado fallos o problemas en los equipos internos de la caldera?

Sí No

9. Describa los fallos o problemas más comunes en los equipos internos:

1.	4.
2.	5.
3.	6.

10. ¿Ha tenido problemas con el sistema de control y monitoreo de la caldera?

Sí No

11. Describa los problemas relacionados con el control y monitoreo:

1.	4.
2.	5.
3.	6.

12. De acuerdo con su experiencia, ¿cuáles de los fallos mencionados anteriormente considera más críticos o con un mayor impacto en la operación y seguridad de la caldera? (Enumere y explique)

13. ¿Qué medidas preventivas o correctivas se han tomado anteriormente para abordar estos fallos? (Enumere y describa)

Observaciones Adicionales:

14. ¿Hay alguna otra información relevante que desee compartir con respecto a los fallos funcionales en la caldera?

ANEXO D MATRIZ AMFEC

MATRIZ AMFEC								Elaborado por: Ing. Sofia Guevara, Ing. Juan Aguilar, Ing. Erick Mejía										
SISTEMA CALDERA PIROTUBULAR																		
SUBSISTEMA	COMPONENTE	FUNCIÓN / PROCESO	FALLOS FUNCIONALES	MODOS DE FALLO		EFECTOS DE FALLO	CONSECUENCIAS DE FALLO				VALORACIÓN DE RIESGO							
				CLASIFICACIÓN A	CLASIFICACIÓN B		FALLO OCULTO	SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO	CONSECUENCIAS DE FALLO	GRAVEDAD	FRECUENCIA DE FALLOS	DETECTABILIDAD	N.P.R.			
COLUMNA	1	CUERPO	A	No mantiene el vapor a alta presión	1	Fugas de vapor	Pérdida de presión, posible daño estructural	1A11	Corrosión	NO	SI	SI	SI	Riesgo de explosión, pérdida de producción	9	1	1	9
								1A12	Deformación estructural	NO	SI	SI	SI		9	1	1	9
								1A13	Agrietamiento estructural	NO	SI	SI	SI		9	1	1	9
								1A14	Fatiga estructural	NO	SI	SI	SI		9	1	1	9
	2	EMPAQUETADURA	B	Fallo en sellado entre componentes			Pérdida de presión, posible contaminación del producto	1B15	Desgaste del empaque	NO	SI	SI	SI	Riesgo de fuga peligrosa, pérdida de eficiencia	7	4	2	56
								1B16	Deterioro de empaque de la tubería	NO	SI	SI	SI		7	4	2	56
	3	VALVULA DE PASO DE VAPOR	C	No controla el flujo de vapor	2	Pérdida de control	Pérdida de capacidad de control, posible sobrepresión	1C21	Bloqueo externo	NO	SI	SI	SI	Riesgo de accidente, pérdida de eficiencia	10	2	1	20
								1C22	Fugas de vapor	NO	SI	SI	SI		10	2	1	20
								1C23	Obstrucción en tubería de salida de vapor	NO	SI	SI	SI		10	2	1	20

EQUIPOS EXTERNOS	4	CUERPO EXTERNO	2	Contener el agua y el vapor dentro de la caldera para lograr aumentar la presión y la temperatura.	A	No protege componentes internos	1	Daños Mecánicos	2A11	Corrosión	Exposición de componentes internos, posible daño estructural	NO	NO	SI	SI	Riesgo de daño estructural, pérdida de aislamiento	2	1	1	2
									2A12	Golpes		NO	NO	SI	SI		2	1	1	2
									2A13	Desgaste		NO	NO	SI	SI		2	1	5	10
	5	TUBERIAS DE ALIMENTACION DE AGUA CONDENSADA			B	Falla en el suministro de agua al sistema	2	Fugas de agua	2B21	Corrosión	Pérdida de agua, posible contaminación del vapor	NO	SI	SI	SI	Riesgo de pérdida de eficiencia, pérdida de producción	7	4	2	56
									2B22	Obstrucción		NO	SI	SI	SI		7	4	1	28
									2B23	Elevada Temperatura		NO	SI	SI	SI		7	4	1	28
	6	TUBERIA DE PURGA			C	No se puede eliminar condensado y sedimentos	3	Bloqueo	2C31	Corrosión	Acumulación de condensado, posible daño de equipos	NO	SI	SI	SI	Riesgo de daño de equipos, pérdida de eficiencia	10	4	5	200
									2C32	Obstrucción		NO	SI	SI	SI		10	4	5	200
	7	SOPORTE			D	No sostiene componentes	4	Debilidad estructural	2D41	Corrosión	Caída de componentes, posible daño estructural	NO	SI	SI	SI	Riesgo de accidente, pérdida de producción	5	1	2	10
									2D42	Deformación		NO	SI	SI	SI		5	1	2	10
	8	VALVULAS DE SEGURIDAD			E	No alivia la presión en caso de sobrepresión	5	No se abre en caso de emergencia	2E51	Corrosión	Falta de protección contra sobrepresión, posible accidente	NO	SI	SI	SI	Riesgo de accidente, daño a la caldera	10	1	1	10
									2E52	Obstrucción		NO	SI	SI	SI		10	1	1	10

EQUIPOS INTERNOS	9	CUERPO INTERNO	3	Contener el agua y los tubos de fuego donde mediante la transferencia de calor aumenta la temperatura y la presión del agua.	A	Falla en contesión de la llama y gases de combustión	1	Fugas de vapor	3A11	Corrosión	Pérdida de eficiencia, posible daño estructural	NO	SI	SI	SI	Riesgo de explosión, pérdida de eficiencia	9	1	7	63
									3A12	Agrietamiento		NO	SI	SI	SI		9	1	7	63
	10	QUEMADOR			B	Falla de combustión eficiente del combustible	2	Fallo de encendido, mal funcionamiento	3B21	Obstrucción	Pérdida de eficiencia, posible apagado del sistema	NO	SI	SI	SI	Riesgo de pérdida de producción, ineficiencia	10	3	8	240
									3B22	Desgaste		NO	SI	SI	SI		10	3	8	240
	11	TUBOS DE HUMO			C	No hay transferencia calor desde la combustión	3	Fugas de gases de humo	3C31	Corrosión	Pérdida de eficiencia de transferencia de calor	NO	SI	SI	SI	Riesgo de pérdida de eficiencia, pérdida de producción	10	7	7	490
									3C32	PH del agua suavizada		NO	SI	SI	SI		10	7	7	490
									3C33	Obstrucción		NO	SI	SI	SI		10	7	7	490
	12	CAMARA DE COMBUSTION			D	No puede contener la combustión y dirigirla	4	Sobrecalentamiento	3D41	Agrietamiento	Pérdida de control de combustión, posible daño estructural	NO	SI	SI	SI	Riesgo de explosión, pérdida de eficiencia	9	1	7	63
	13	ELECTRODOS			E	No enciende y mantiene la llama	5	Fallo de ignición	3E51	Desgaste	Pérdida de control de la llama, posible apagado	NO	SI	SI	SI	Riesgo de apagado del sistema, pérdida de producción	10	7	5	350
	14	TRANSFORMADOR DE IGNICIÓN			F	No proporciona energía para la ignición	6	Fallo de encendido	3F61	Fallo eléctrico	Pérdida de encendido, posible apagado del sistema	NO	SI	SI	SI	Riesgo de apagado del sistema, pérdida de producción	3	1	7	21

CONTROL Y MONITOREO	15	CONTACTOR	4	Dispositivos de control monitorear y regular parametros (Presión, temperatura, flujo de gas y aire) de operación de la caldera	A	No controla el flujo de energía eléctrica	1	Fallo en el control	4A11	Fallo eléctrico	Pérdida de control de la ignición, posible apagado	NO	SI	SI	SI	Riesgo de apagado del sistema, pérdida de producción	5	1	2	10
	16	BOTONERA			B	No controla y opera el sistema	2	Fallo de botones, mal funcionamiento	4B21	Daño mecánico	Pérdida de control y operatividad, posible apagado	NO	SI	SI	SI	Riesgo de apagado del sistema, pérdida de producción	5	1	2	10
	17	BREAKERS			C	No protege el sistema eléctrico	3	No se activa en caso de cortocircuito	4C31	Fallo eléctrico	Riesgo de cortocircuito, daño eléctrico	NO	SI	SI	SI	Riesgo de daño eléctrico, pérdida de producción	5	1	2	10
	18	CONTROLADOR DE QUEMADOR			D	No regula el funcionamiento del quemador	4	Pérdida de control	4D41	Fallo electrónico	Pérdida de control de la combustión, posible apagado	NO	SI	SI	SI	Riesgo de apagado del sistema, pérdida de producción	5	1	2	10
	19	CONTROLADOR DE LLAMA			E	Falla en monitorear y mantener la llama	5	Pérdida de control	4E51	Fallo electrónico	Pérdida de control de la llama, posible apagado	NO	SI	SI	SI	Riesgo de apagado del sistema, pérdida de producción	5	1	2	10
	20	SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA INTERNA			F	Falla en alimentar el sistema eléctrico	6	Pérdida de suministro	4F61	Fallo eléctrico	Pérdida de energía eléctrica, posible apagado	NO	SI	SI	SI	Riesgo de apagado del sistema, pérdida de producción	5	1	2	10
	21	PRESSURETROL DE OPERACIÓN			G	No controla la presión de operación	7	Pérdida de control	4G71	Bloqueo	Pérdida de control de la presión, posible sobrepresión	NO	SI	SI	SI	Riesgo de sobrepresión, pérdida de producción	5	1	2	10
	22	MANOMETRO DE PRESION			H	No hay lectura de la presión del sistema	8	Lectura incorrecta	4H81	Daño en la escala	Pérdida de lectura precisa, posible sobrepresión	NO	SI	SI	SI	Riesgo de sobrepresión, pérdida de control	5	1	2	10
	23	MANOMETRO DE TEMPERATURA			I	No hay lectura de la temperatura del sistema	9	Lectura incorrecta	4I91	Daño en la escala	Pérdida de lectura precisa, posible sobrecalentamiento	NO	SI	SI	SI	Riesgo de sobrecalentamiento, pérdida de control	5	1	2	10
	24	VALVULA DE CONTROL DE GAS			J	No regula el flujo de gas	10	Pérdida de control	4J101	Bloqueo	Pérdida de control del combustible, posible apagado	NO	SI	SI	SI	Riesgo de apagado del sistema, pérdida de producción	5	1	3	15
									4J102	Fugas		NO	SI	SI	SI		5	1	3	15
	25	VALVULA REGULADORA DE AIRE			K	No regula el flujo de aire	11	Pérdida de control	4K111	Bloqueo	Pérdida de control de la combustión, posible apagado	NO	SI	SI	SI	Riesgo de apagado del sistema, pérdida de producción	5	1	3	15
4K112			Obstrucción	NO					SI	SI		SI	5	1	3		15			
26	MCDONELL	L	No controla el flujo/ nivel de agua	12	Pérdida de control	4L121	Bloqueo	Pérdida de control del agua, posible sobrecalentamiento	NO	SI	SI	SI	Riesgo de sobrecalentamiento, pérdida de control, nivel inadecuado de agua	10	2	7	140			
						4L122	Fugas		NO	SI	SI	SI		10	2	7	140			

VARIOS	27	VENTILADOR DE MOTOR	5	Equipos auxiliares que permiten visualizar la llama generada en la combustión, los niveles de agua.	A	Falla en proporcionar aire de combustión	1	Fallo en el funcionamiento	5A11	Bloqueo	Pérdida de suministro de aire, posible apagado	NO	SI	SI	SI	Riesgo de apagado del sistema, pérdida de producción	5	1	2	10
									5A12	Desgaste		NO	SI	SI	SI		5	1	2	10
	28	EMPAQUES DE COMPUERTAS			B	Falle en sellado hermético de compuertas	2	Fugas de aire, gases o vapor	5B21	Daño mecánico	Pérdida de hermeticidad, posible sobrecalentamiento	NO	SI	SI	SI	Riesgo de sobrecalentamiento, pérdida de eficiencia	5	1	3	15
									5B22	Desgaste		NO	SI	SI	SI		5	1	3	15
	29	VISOR DE LLAMA			C	Fallas en monitoreo de la presencia de la llama	3	No detecta la llama	5C31	Daño mecánico	Fallo en la detección de la llama, posible apagado	NO	SI	SI	SI	Riesgo de apagado del sistema, pérdida de control	5	7	1	35
									5C32	Suciedad		NO	SI	SI	SI		5	7	1	35
	30	EMPAQUES DE QUEMADOR			D	Falla en sellado hermético del quemador	4	Fugas de aire o combustible	5D41	Daño mecánico	Pérdida de hermeticidad, posible apagado del sistema	NO	SI	SI	SI	Riesgo de apagado del sistema, pérdida de eficiencia	5	2	2	20
									5D42	Desgaste		NO	SI	SI	SI		5	2	2	20
	31	VISOR DE NIVEL DE AGUA			E	Falla en monitoreo el nivel de agua en la caldera	5	No detecta el nivel de agua	5E51	Daño mecánico	Fallo en la detección del nivel de agua, posible apagado	NO	SI	SI	SI	Riesgo de apagado del sistema, pérdida de control	10	7	2	140
									5E52	Suciedad		NO	SI	SI	SI		10	7	2	140

ANEXO E PLAN DE MANTENIMIENTO

Plan de Mantenimiento Diario

Nº	Componente	Tipo de mantenimiento	Descripción tarea propuesta de mantenimiento	Acción para realizar	Tipo de tarea de mantenimiento	Personal responsable
3	Válvula de paso de vapor	PM	Revisar si existe un bloque de piezas externas	Retirar piezas	Limpieza	Mecánico
3	Válvula de paso de vapor	PM	Revisar válvula de vapor	Verificar las fugas de las válvulas	Inspección	Mecánico
5	Tuberías de alimentación de agua condensada	PM	Revisar toda las tuberías y retorno de condensado	Verificar la presencia de oxido o solidos en suspensión	Inspección	Mecánico
5	Tuberías de alimentación de agua condensada	PM	Verificar la temperatura del agua del condensado	registrar la temperatura del agua.	Inspección	Mecánico
6	Tubería de purga	PM	Efectuar purgas de fondo	Abrir la válvula de purga rápida y luego la válvula de purga de apertura lenta, para evitar choques.	Limpieza	Mecánico
11	Tubos de humo	PM	Controlar el pH del agua suavizada que este entre los valores de 8.5 -10	Tomar muestras del agua	Inspección	Mecánico
18	Controlador de quemador	PM	Verificar el correcto funcionamiento del programador	Cumplir el ciclo (pre-purga, ignición, prueba de llama, llama principal, post purga)	Inspección	Mecánico
19	Controlador de llama	PM	Verificar la forma y color de llama	Comprobar visualmente la forma homogénea.	Inspección	Mecánico
24	Válvula de control de gas	PM	Verificar la presión de combustible (GLP)	La presión de combustible debe estar en el rango de trabajo	Inspección	Mecánico
27	Ventilador de motor	PM	Revisar el funcionamiento del ventilador del quemador	Observar los componentes del ventilador que estén trabajando en forma normal	Inspección	Mecánico
29	Visor de llama	PM	Revisar el visor de llama	Observar el visor	Inspección	Mecánico
31	Visor de nivel de agua	PM	Revisar el visor de nivel de agua	Observar el tubo de nivel de agua del McDonell	Inspección	Mecánico

Plan de Mantenimiento Semanal

N°	Componente	Tipo de mantenimiento	Descripción tarea propuesta de mantenimiento	Acción para realizar	Tipo de tarea de mantenimiento	Personal responsable
13	Electrodos	PM	Verificación y limpieza del electrodo	Limpiar el carboncillo formado y mantener la separación adecuada	Limpieza	Mecánico
28	Empaques de compuertas	PM	Comprobar que no hay fugas de gases, en los empaques de ambas tapas, ni visor.	Sellar las fugas y reajustar pernos de las compuertas de ser necesario.	Inspección	Mecánico

Plan de Mantenimiento Mensual

N°	Componente	Tipo de mantenimiento	Descripción tarea propuesta de mantenimiento	Acción para realizar	Tipo de tarea de mantenimiento	Personal responsable
2	Empaquetadura	PdM	Inspeccionar los puntos calientes	Utilizar cámara termográfica	Inspección	Personal calificado
5	Tuberías de alimentación de agua condensada	PM	Verificar el estado y funcionamiento de las trampas de vapor y accesorios en el retorno de condensado	Utilizar ultrasonido	Inspección	Mecánico
6	Tubería de purga	PM	Revisar todas las tuberías	Verificar la presencia de óxido o sólidos en suspensión	Inspección	Mecánico
8	Válvulas de seguridad	PM	Revisar, limpiar y probar las válvulas de seguridad	Ver si existe fuga de vapor en las válvulas de seguridad o niples de conexión, probar la apertura de las válvulas. anualmente regulación y certificación de la presión de descarga.	Inspección y Calibración	Mecánico / Personal calificado
10	Quemador	PM	Revisar el funcionamiento del quemador, desarmando y limpiando el sistema de encendido y los electrodos	Limpiar las toberas, limpiar los electrodos y darle la tolerancia adecuada, revisar si las aletas tienen deformidad, revisar las varillas de control, limpiar los componentes y revisar los cables eléctricos.	Inspección, limpieza y reemplazo	Mecánico / Personal calificado
14	Transformador de ignición	PM	Verificar funcionamiento	Probar el funcionamiento del componente, si están averiados reemplazarlo.	Inspección y reemplazo	Mecánico / Personal calificado
15	Contactador	PM	Verificar funcionamiento	Probar el funcionamiento del componente, si están averiados reemplazarlo.	Inspección y reemplazo	Mecánico / Personal calificado
16	Botonera	PM	Verificar funcionamiento	Probar el funcionamiento del componente, si están averiados reemplazarlo.	Inspección y reemplazo	Mecánico / Personal calificado

17	Breakers	PM	Verificar funcionamiento	Probar el funcionamiento del componente, si están averiados reemplazarlo.	Inspección y Reemplazo	Mecánico / Personal calificado
21	Pressuretrol de operación	PM	Verificar funcionamiento	Probar el funcionamiento del componente, si están averiados reemplazarlo.	Inspección y Reemplazo	Mecánico / Personal calificado
24	Válvula de control de gas	PM	Revisar, limpiar y probar válvula solenoide y controles	Limpiar y comprobar su funcionamiento mediante pruebas eléctricas, si están averiadas reemplazarlas.	Inspección y Reemplazo	Mecánico / Personal calificado
25	Válvula reguladora de aire	PM	Revisar, limpiar y probar válvula solenoide y controles	Limpiar y comprobar su funcionamiento mediante pruebas eléctricas, si están averiadas reemplazarlas.	Inspección y Reemplazo	Mecánico / Personal calificado
26	McDonell	PM	Revisar estado general	Limpieza y comprobar funcionamiento	Inspección	Mecánico
26	McDonell	PM	Cambiar las empaquetaduras del tubo visor del nivel de agua	Cambiar empaquetaduras	Reemplazo	Mecánico
27	Ventilador de motor	PM	Lubricar los rodamientos y piezas móviles	Lubricar los rodajes, ejes y partes metálicas móviles en contacto	Limpieza	Mecánico
29	Visor de llama	PM	Limpiar visor de llama	Esta tarea realizarla cuando la caldera se encuentra totalmente apagada o antes de encenderla, limpiar y secar	Limpieza	Mecánico
31	Visor de nivel de agua	PM	Limpiar visor de nivel de agua	Limpieza de visor y su base (extracción de sedimentos)	Limpieza	Mecánico

Plan de Mantenimiento Semestral

Nº	Componente	Tipo de mantenimiento	Descripción tarea propuesta de mantenimiento	Acción para realizar	Tipo de tarea de mantenimiento	Personal responsable
2	Empaquetadura	PM	Revisar la empaquetadura	Cambiar la empaquetadura de ser necesario	Reemplazo	Personal externo
11	Tubos de humo	PdM	Revisión de tubos	dejar que se enfríe la caldera para ver en qué condiciones se encuentra la superficie de los tubos, verificar si hay corrosión, picadura o incrustaciones	Inspección	Personal externo
11	Tubos de humo	PM	Realizar limpieza mecánica de los tubos de humo (deshollinado)	Limpiar el hollín con una escobilla de fierro los tubos de humo, flue.	Limpieza	Personal externo
22	Manómetro de presión	PM	Verificar los valores del manómetro	Calibrar y/o reemplazar	Inspección / calibración / reemplazo	Personal externo
23	Manómetro de temperatura	PM	Verificar los valores del termómetro de gases	Calibrar y/o reemplazar	Inspección / calibración / reemplazo	Personal externo

28	Empaques de compuertas	PM	Cambiar empaquetaduras de compuertas	Reemplazar las empaquetaduras de las puertas.	Reemplazo	Personal externo
30	Empaques de quemador	PM	Revisar la empaquetadura	Cambiar la empaquetadura de ser necesario	Reemplazo	Personal externo

Plan de Mantenimiento Anual

N°	Componente	Tipo de mantenimiento	Descripción tarea propuesta de mantenimiento	Acción para realizar	Tipo de tarea de mantenimiento	Personal responsable
1	Cuerpo	PdM	Inspeccionar las placas, realizar prueba hidrostática al 50% a la presión de trabajo durante una hora, debe ser realizado por personal especializado	Realizar una medición de espesores de placas de la caldera, mediante equipos de ultrasonidos para calderas con mayor de 10 años de vida útil,	Inspección	Personal externo
3	Válvula de paso de vapor	PM	Revisar componentes de la válvula check-globo	Cambio de accesorios internos, revisión de juntas de dilatación	Reemplazo	Personal externo
4	Cuerpo externo	PM	Revisar el aislamiento térmico del cuerpo	Verificar los puntos calientes de la caldera, verificar estado de aislamiento térmico.	Inspección	Personal externo
7	Soporte	PM	Realizar mantenimiento de la estructura	Verificación del anclaje, pintado de escaleras, plataformas de apertura de válvulas.	Inspección y reforzamiento	Personal externo
9	Cuerpo interno	PM	Verificar el estado general	Verificar en qué condiciones se encuentra, si hay fisuras visibles u otro aspecto relevante para su reparación	Inspección y reforzamiento	Personal externo
10	Quemador	PM	Desmontaje totalmente del quemador y cambiar los componentes en mal estado. cambiar toberas y electrodos	Revisión y limpieza, bomba de combustible, motor de ventilador, deflector, regulador de aire, sensor de llama, reemplazar de ser necesario. toberas desbocadas y no atomiza bien al quemar los combustibles, electrodos con desgaste o con presencia de fisura.	Inspección, limpieza y reemplazo	Personal externo
12	Cámara de combustión	PM	Verificar el estado por fisuras	Utilizar ultrasonido	Inspección y calibración	Personal externo
20	Suministro de energía eléctrica interna	PM	Revisar todo el sistema eléctrico	Medición de la resistividad de la puesta a tierra, revisión y limpieza desde la alimentación eléctrica hasta la caldera	Prueba y mantenimiento eléctrico	Personal externo

ANEXO F CALCULO θ Y β POR DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

TUBOS DE HUMO

v Σ Σ Σ Σ
 4 0.644 0.109 -0.395 -0.084

ni	TO (horas) ordenados	B= ln(to)	bi=1/ln(to)	bi^2	ps=yi	ln(1/yi)	A= ln(ln(1/yi))	Zi= A/B	Zi*bi	$X = v \cdot \Sigma(Z_i \cdot \beta_i) - (\Sigma Z_i \cdot \Sigma \beta_i)$	$\Delta = \Sigma \beta_i \cdot \Sigma(Z_i \cdot \beta_i) - (\Sigma Z_i \cdot \Sigma \beta_i)$	$\theta = \exp(X/\Delta)$	$\beta = \Sigma(Z_i \cdot \beta_i) / (\Sigma \beta_i - (\ln \theta \cdot \Sigma \beta_i))$
1	104	4.644	0.215	0.046	0.800	0.223	-1.500	-0.323	-0.070	-0.082514958	-0.01108111	1,713.77	0.494791835
2	408	6.011	0.166	0.028	0.600	0.511	-0.672	-0.112	-0.019				
3	712	6.568	0.152	0.023	0.400	0.916	-0.087	-0.013	-0.002				
4	8472	9.045	0.111	0.012	0.200	1.609	0.476	0.053	0.006				
										R(t). Weibull	0.75	138.1	
										TPO. Weibull	3,495.09		

TUBERIA DE PURGA

n Σ Σ Σ Σ
 4 0.518 0.068 -0.276 -0.042

ni	TO (horas) ordenados	B= ln(to)	bi=1/ln(to)	bi^2	ps=yi	ln(1/yi)	A= ln(ln(1/yi))	Zi= A/B	Zi*bi	$X = v \cdot \Sigma(Z_i \cdot \beta_i) - (\Sigma Z_i \cdot \Sigma \beta_i)$	$\Delta = \Sigma \beta_i \cdot \Sigma(Z_i \cdot \beta_i) - (\Sigma Z_i \cdot \Sigma \beta_i)$	$\theta = \exp(X/\Delta)$	$\beta = \Sigma(Z_i \cdot \beta_i) / (\Sigma \beta_i - (\ln \theta \cdot \Sigma \beta_i))$
1	648	6.474	0.154	0.024	0.800	0.223	-1.500	-0.232	-0.036	-0.026456115	-0.0031557	4374.717154	0.801825311
2	2040	7.621	0.131	0.017	0.600	0.511	-0.672	-0.088	-0.012				
3	4896	8.496	0.118	0.014	0.400	0.916	-0.087	-0.010	-0.001				
4	6104	8.717	0.115	0.013	0.200	1.609	0.476	0.055	0.006				
										R(t). Weibull	0.750182670	924	
										TPO. Weibull	4948.510524		

QUEMADOR

n Σ Σ Σ Σ
 2 0.306 0.050 -0.161 -0.031

ni	TO (horas) ordenados	B= ln(to)	bi=1/ln(to)	bi^2	ps=yi	ln(1/yi)	A= ln(ln(1/yi))	Zi= A/B	Zi*bi	$X = v \cdot \Sigma(Z_i \cdot \beta_i) - (\Sigma Z_i \cdot \Sigma \beta_i)$	$\Delta = \Sigma \beta_i \cdot \Sigma(Z_i \cdot \beta_i) - (\Sigma Z_i \cdot \Sigma \beta_i)$	$\theta = \exp(X/\Delta)$	$\beta = \Sigma(Z_i \cdot \beta_i) / (\Sigma \beta_i - (\ln \theta \cdot \Sigma \beta_i))$
1	192	5.257	0.190	0.036	0.667	0.405	-0.903	-0.172	-0.033	-0.013613793	-0.001634768	4136.731913	0.294029853
2	5696	8.648	0.116	0.013	0.333	1.099	0.094	0.011	0.001				
3													
4										R(t). Weibull	0.750811036	59	
										TPO. Weibull	41988.43056		

MCDONELL

n Σ Σ Σ Σ
 2 0.262 0.035 -0.126 -0.019

ni	TO (horas) ordenados	B= ln(to)	bi=1/ln(to)	bi^2	ps=yi	ln(1/yi)	A= ln(ln(1/yi))	Zi= A/B	Zi*bi	$X = v \cdot \Sigma(Z_i \cdot \beta_i) - (\Sigma Z_i \cdot \Sigma \beta_i)$	$\Delta = \Sigma \beta_i \cdot \Sigma(Z_i \cdot \beta_i) - (\Sigma Z_i \cdot \Sigma \beta_i)$	$\theta = \exp(X/\Delta)$	$\beta = \Sigma(Z_i \cdot \beta_i) / (\Sigma \beta_i - (\ln \theta \cdot \Sigma \beta_i))$
1	744	6.612	0.151	0.023	0.667	0.405	-0.903	-0.137	-0.021	-0.005880531	-0.000670849	6411.235118	0.419135774
2	8024	8.990	0.111	0.012	0.333	1.099	0.094	0.010	0.001				
3													
4										R(t). Weibull	0.750852356	325	
										TPO. Weibull	18827.00627		

ANEXO G CALCULO DE MTTF MEJORADO

Tabla G.1 Resultados del cálculo del MTTF mejorado para cada componente (Elaboración propia).

Ítem	Componente	Modo de fallo OREDA	μ de OREDA	σ OREDA	T	r	FF mejorado	MTTF mejorado
1	Cuerpo	External leakage	0.00005479	0.00005479	296,640.00	1	0.000006351	157,445.75
2	Empaquetadura	External leakage	0.00005479	0.00005479	49,440.00	1	0.000029546	33,845.75
3	Válvula de paso de vapor	Other	0.00016437	0.00016437	69,216.00	1	0.000026560	37,649.92
4	Cuerpo externo	Insufficient heat transfer	0.00230112	0.00230112	296,640.00	1	0.000006732	148,537.29
5	Tuberías de alimentación de agua condensada	External leakage	0.00005479	0.00005479	39,552.00	1	0.000034600	28,901.75
6	Tubería de purga	External leakage	0.00005479	0.00005479	4,944.00	1	0.000086224	11,597.75
7	Soporte	Minor in service problems	0.00035613	0.00035613	296,640.00	1	0.000006679	149,723.98
8	Válvulas de seguridad	Minor in service problems	0.00035613	0.00035613	98,880.00	1	0.000019668	50,843.98
9	Cuerpo interno	Minor in service problems	0.00035613	0.00035613	296,640.00	1	0.000006679	149,723.98
10	Quemador	Insufficient heat transfer	0.00008218	0.00008218	49,440.00	1	0.000032463	30,804.21
11	Tubos de humo	Insufficient heat transfer	0.00008218	0.00008218	197,760.00	1	0.000009527	104,964.21
12	Cámara de combustión	Insufficient heat transfer	0.00230112	0.00230112	98,880.00	1	0.000020138	49,657.29
13	Electrodos	Insufficient heat transfer	0.00230112	0.00230112	4,944.00	1	0.000371846	2,689.29
14	Transformador de ignición	Minor in service problems	0.00035613	0.00035613	29,664.00	1	0.000061592	16,235.98
15	Contactador	Minor in service problems	0.00035613	0.00035613	98,880.00	1	0.000019668	50,843.98
16	Botonera	Minor in service problems	0.00035613	0.00035613	98,880.00	1	0.000019668	50,843.98
17	Breakers	Minor in service problems	0.00035613	0.00035613	98,880.00	1	0.000019668	50,843.98
18	Controlador de quemador	Minor in service problems	0.00035613	0.00035613	98,880.00	1	0.000019668	50,843.98
19	Controlador de llama	Minor in service problems	0.00035613	0.00035613	49,440.00	1	0.000038279	26,123.98
20	Suministro de energía eléctrica interna	Minor in service problems	0.00035613	0.00035613	49,440.00	1	0.000038279	26,123.98
21	Pressuretrol de operación	Abnormal instrument reading	0.00021915	0.00021915	98,880.00	1	0.000019334	51,721.54
22	Manómetro de presión	Abnormal instrument reading	0.00021915	0.00021915	19,776.00	1	0.000082172	12,169.54

23	Manómetro de temperatura	Abnormal instrument reading	0.00021915	0.00021915	19,776.00	1	0.000082172	12,169.54
24	Válvula de control de gas	Minor in service problems	0.00035613	0.00035613	49,440.00	1	0.000038279	26,123.98
25	Válvula reguladora de aire	Minor in service problems	0.00035613	0.00035613	49,440.00	1	0.000038279	26,123.98
26	McDonnell	Abnormal instrument reading	0.00021915	0.00021915	296,640.00	1	0.000006640	150,601.54
27	Ventilador de motor	Minor in service problems	0.00035613	0.00035613	49,440.00	1	0.000038279	26,123.98
28	Empaques de compuertas	External leakage	0.00005479	0.00005479	9,888.00	1	0.000071074	14,069.75
29	Visor de llama	Abnormal instrument reading	0.00021915	0.00021915	19,776.00	1	0.000082172	12,169.54
30	Empaques de quemador	External leakage	0.00005479	0.00005479	49,440.00	1	0.000029546	33,845.75
31	Visor de nivel de agua	Abnormal instrument reading	0.00021915	0.00021915	9,888.00	1	0.000138398	7,225.54

Tabla G.2 OREDA para calderas pirotubulares

OREDA-2002

502

OREDA-2002

Taxonomy no 3.3.3		Item Mechanical Equipment Heaters and boilers HC fired boiler								
Population 1	Installations 1	Aggregated time in service (10 ⁶ hours)					No of demands			
		Calendar time * 0.0493		Operational time † 0.0365						
Failure mode	No of failures	Failure rate (per 10 ⁶ hours)					Active rep. hrs	Repair (manhours)		
		Lower	Mean	Upper	SD	n/t		Min	Mean	Max
Critical	3*	16.64	60.89	157.39	60.89	60.89	2.8	1.0	2.8	4.0
	3†	22.46	82.18	212.44	82.18	82.18				
Insufficient heat transfer	3*	16.64	60.89	157.39	60.89	60.89	2.8	1.0	2.8	4.0
	3†	22.46	82.18	212.44	82.18	82.18				
Degraded	86*	1447.77	1745.41	2088.20	1745.41	1745.41	3.2	0.5	3.2	16.0
	86†	1954.16	2355.91	2818.59	2355.91	2355.91				
External leakage - Utility medium	1*	1.01	20.30	96.30	20.30	20.30	2.0	2.0	2.0	2.0
	1†	1.37	27.39	129.99	27.39	27.39				
Insufficient heat transfer	84*	1410.81	1704.82	2044.01	1704.82	1704.82	3.2	0.5	3.2	16.0
	84†	1904.26	2301.12	2758.94	2301.12	2301.12				
Plugged/Choked	1*	1.01	20.30	96.30	20.30	20.30	8.0	8.0	8.0	8.0
	1†	1.37	27.39	129.99	27.39	27.39				
Incipient	29*	421.03	588.57	802.48	588.57	588.57	2.9	0.5	2.9	11.0
	29†	568.30	794.43	1083.17	794.43	794.43				
Abnormal instrument reading	8*	80.78	162.36	292.97	162.36	162.36	1.6	0.5	1.6	3.0
	8†	109.03	219.15	395.44	219.15	219.15				
External leakage - Process medium	2*	7.20	40.59	127.76	40.59	40.59	2.5	2.0	2.5	3.0
	2†	9.72	54.79	172.45	54.79	54.79				
Minor in-service problems	13*	156.03	263.84	419.42	263.84	263.84	4.0	1.5	4.0	11.0
	13†	210.61	356.13	566.13	356.13	356.13				
Other	6*	53.07	121.77	240.30	121.77	121.77	2.3	1.0	2.3	7.0
	6†	71.64	164.37	324.35	164.37	164.37				

Ecuaciones para el cálculo de FF mejorado

Media Oreda $\mu_{OREDA} = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3$ (Ecuación G.1)

Desviación Estándar $\sigma_{OREDA} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}$ (Ecuación G.2)

$$\mathbf{FF}_{mejorada} = \frac{r + \left(\frac{(\mu_{OREDA})^2}{(\sigma_{OREDA})^2} \right)}{\left[\frac{t}{\sum_{i=1}^t} + \frac{N-r}{\sum_{j=1}^{N-r} t_{cj}} \right] + \frac{\mu_{OREDA}}{(\sigma_{OREDA})^2}} \quad \text{(Ecuación G.3)}$$

ANEXO H CÁLCULO DEL COSTO ANUAL DEL MANTENIMIENTO ACTUAL

Tabla H.1 Cálculo de las horas de las tareas de mantenimiento (Elaboración propia).

Distribución de horas										
Ítem	Ref.	Máquina/Herramienta	Hs.Est	Frec./Año	Superintendente	Ing. De mtto	Supervisor	Mecánico	Operador	Contratista
1	1	Mantenimiento semestral Caldera (Subcontratado).	80	2	10	3	5		30	80
2	1-1	Mantenimiento preventivo Caldera (Revisión de quemador, inspección de dispositivos de seguridad y análisis de combustión).	20	3	2	1	2		20	
3	1-3	Tren de alimentación de Gas- caldera (Limpieza externa y validación de funcionamiento de dispositivos).	5	2			2	2	5	
4	1-4	Inspección de combustión caldera (Medición de eficiencia de combustión).	5	6	2	1			5	
5		Inspección diaria. Inspección visual para detectar fugas en la caldera y en tuberías de purga y de alimentación de agua.	2	206					2	
6		Inspección mensual. Inspección visual del cuerpo de la caldera, toma de muestra de agua de drenaje de caldera para identificar si el agua está contaminada.	4	12	1	1			4	
7		Inspección anual. Inspección general de la caldera, revisión de parámetros del controlador del quemador y seteo de los Pressuretrol.	6	1	2	2	1		6	
8	4	Círculo de agua: purgas y alimentación de agua condensada (Inspección de tuberías, prueba de válvulas)	3	2			1		3	
9	5-3	Inspección de Red de alimentación de GLP y tanque de almacenaje de gas (Inspección de tubería, uniones, válvulas, codos, etc. Objetivo: identificar fugas de GLP).	4	4					4	
10	9	Mantenimiento de circuito de distribución de vapor (Inspección de tubería, uniones, válvulas, codos, soportes, etc.).	6	2				6	6	
11	9-1	Mantenimiento de circuito de agua condensada (Inspección de tubería, uniones, válvulas, codos, soportes, etc.).	5	2			2		5	

12	9-2	Mantenimiento de circuito de agua Suavizada (Inspección de tubería, uniones, válvulas, codos, soportes, etc.).	3	2			1	3	
Total			143	244	52	29	23	22	676

Tabla H.2 Cálculo de los costos anuales de las tareas de mantenimiento (Elaboración propia).

Costo de Mantenimiento actual								
Ítem	Ref.	Máquina/Herramienta	Mano de Obra	Repuestos y Materiales	Tasa de falla por año	Costos de pérdida de producción (\$) por año	Costo Total Anual	
1	1	Mantenimiento semestral Caldera (Subcontratado).	\$ 4,268.98	\$ 1,181.62	1.00	\$55,072.25	\$60,522.85	
2	1-1	Mantenimiento preventivo Caldera (Revisión de quemador, inspección de dispositivos de seguridad y análisis de combustión).	\$ 451.47	\$ 263.06	0.20	\$2,814.56	\$3,529.09	
3	1-3	Tren de alimentación de Gas- caldera (Limpieza externa y validación de funcionamiento de dispositivos).	\$ 95.05	\$ 2.87	1.00	\$3,407.87	\$3,505.79	
4	1-4	Inspección de combustión caldera (Medición de eficiencia de combustión).	\$ 376.70	\$ 8.62	1.00	\$3,413.62	\$3,798.95	
5		Inspección diaria. Inspección visual para detectar fugas en la caldera y en tuberías de purga y de alimentación de agua.	\$ 2,069.36	\$ 296.02	1.00	\$1,658.02	\$4,023.41	
6		Inspección mensual. Inspección visual del cuerpo de la caldera, toma de muestra de	\$ 513.48	\$ 17.24	1.00	\$2,741.24	\$3,271.97	

		agua de drenaje de caldera para identificar si el agua está contaminada.					
7		Inspección anual. Inspección general de la caldera, revisión de parámetros del controlador del quemador y seteo de los Pressuretrol.	\$ 81.72	\$ 1.44	0.10	\$410.04	\$493.19
8	4	Circuito de agua: purgas y alimentación de agua condensada (Inspección de tuberías, prueba de válvulas)	\$ 42.50	\$ 132.25	2.00	\$4,153.56	\$4,328.31
9	5-3	Inspección de Red de alimentación de GLP y tanque de almacenaje de gas (Inspección de tubería, uniones, válvulas, codos, etc. Objetivo: identificar fugas de GLP).	\$ 80.36	\$ 5.75	1.00	\$2,729.75	\$2,815.86
10	9	Mantenimiento de circuito de distribución de vapor (Inspección de tubería, uniones, válvulas, codos, soportes, etc.).	\$ 120.55	\$ 2.87	0.75	\$3,067.37	\$3,190.79
11	9-1	Mantenimiento de circuito de agua condensada (Inspección de tubería, uniones, válvulas, codos, soportes, etc.).	\$ 70.32	\$ 2.87	0.25	\$854.12	\$927.32
12	9-2	Mantenimiento de circuito de agua Suavizada (Inspección de tubería, uniones, válvulas, codos, soportes, etc.).	\$ 40.18	\$ 2.87	2.00	\$4,088.87	\$4,131.93

Total	\$ 8,210.66	\$ 1,917.51	\$84,411.29	\$94,539.46
-------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabla H.3 Cálculo de los costos de herramientas (Elaboración propia).

Costo de herramientas				
Cantidad	Descripción	Costo	Tiempo de vida útil	Depreciación en 1 año
1	Amperímetro digital tenaza 400a/600v trm	\$ 79.87	5	\$ 15.97
1	Navaja klein	\$ 33.94	5	\$ 6.79
1	Tenaza para electricista 9 pulgadas mango amarillo	\$ 49.00	5	\$ 9.80
1	Set de cubo 1/2 pulgada 12puntos-10-22mm	\$ 52.90	5	\$ 10.58
1	Linterna mano led 250 lumens 3aaa aluminio negro	\$ 10.95	3	\$ 3.65
1	Llave stillson 12 pulgadas	\$ 13.15	5	\$ 2.63
1	Llave stillson 18 pulgadas	\$ 27.15	5	\$ 5.43
1	Caja organizadora metálica para herramientas 19 pulgada	\$ 29.50	8	\$ 3.69
1	Set de destornillador phillips/plano industrial	\$ 15.50	5	\$ 3.10
	Llave cangreja 6 pulgadas	\$ 6.15	5	\$ 1.23
1	Set de llave mixta 7-24 mm	\$ 51.45	10	\$ 5.15
1	Set de llave allen 1/16-1/4 plg	\$ 4.60	5	\$ 0.92
1	Cortador manual para vidrio	\$ 2.10	3	\$ 0.70
1	Escalera 2 bandas domestico de aluminio 200 libra 6 ft tipo iii	\$ 53.49	8	\$ 6.69
1	Tarraja para rosca tubo 1/2-2 plg con caja plástica	\$ 195.00	10	\$ 19.50
	Total			\$ 95.82

Tabla H.4 Cálculo de los costos de consumibles (Elaboración propia).

Costo de consumibles				
Cantidad	Descripción	Costo mensual	Consumo mensual	Costo anual
1	Wd-40 aerosol 13.2 ozf	\$ 6.95	7	\$ 48.65
1	Wipe de tela	\$ -		\$ -
1	Limpiador para contactos eléctricos 16-102	\$ 14.00	5	\$ 70.00
1	Insumos de oficina; papelería, bolígrafos etc.	5	2	\$ 10.00
	Total			\$ 80.00

Tabla H.5 Cálculo de los costos de EPP (Elaboración propia).

Costo de EPP				
Cantidad	Descripción	Costo	Consumo mensual	Costo anual
1	Kit de arnés 4 argolla + cuerda de posicionamiento en y	\$ 121.95	0.20	\$ 24.39
1	Casco para trabajo en altura	\$ 31.50	0.20	\$ 6.30
1	Mascarilla medio rostro 3m 6200 3m	\$ 23.95	0.20	\$ 4.79
1	Filtro contra material particulado p100 para uso en respirador	\$ 11.30	5.00	\$ 56.50
1	Guantes para temperatura	\$ 5.00	4.00	\$ 20.00
1	Careta protección facial ingco	\$ 6.95	2.00	\$ 13.90
1	Bota de seguridad con cubo	\$ 64.00	1.00	\$ 64.00
1	Dispositivos de bloqueo	\$ 59.36	0.13	\$ 7.42
1	Gafa seguridad plástico	\$ 0.95	2.00	\$ 1.90
			TOTAL	\$ 174.81

ANEXO I CÁLCULO COSTO ANUAL DE MANTENIMIENTO PROPUESTO

Componente	FF (fallos/año)	Costo de componente (\$)	Costo de componente anualizado (\$)	Costos de logística (\$) por año	Costos de pérdida de producción (\$) por año	Costo Mantenimiento (Propuesto)
Cuerpo	0.0311	3,125.0	\$97.18	\$14.58	\$1,016.48	\$1,128.27
Empaquetadura	0.1458	562.5	\$82.03	\$12.31	\$794.53	\$889.69
Válvula de paso de vapor	0.1310	312.5	\$40.94	\$6.14	\$1,070.50	\$1,118.25
Cuerpo externo	0.0325	2,500.0	\$81.19	\$12.18	\$2,654.00	\$2,747.41
Tuberías de alimentación de agua condensada	0.1708	187.5	\$32.02	\$4.80	\$930.44	\$968.40
Tubería de purga	0.4256	56.3	\$23.94	\$3.59	\$2,318.67	\$2,353.25
Soporte	0.0327	250.0	\$8.18	\$1.23	\$1,068.90	\$1,078.35
Válvulas de seguridad	0.0971	1,000.0	\$97.08	\$14.56	\$528.90	\$640.91
Cuerpo interno	0.0314	1,875.0	\$58.91	\$8.84	\$5,134.93	\$5,202.71
Quemador	0.1589	12,500.0	\$1,986.74	\$298.01	\$5,195.41	\$7,481.15
Tubos de humo	0.0448	25,000.0	\$1,120.38	\$168.06	\$7,324.61	\$8,613.13
Cámara de combustión	0.0986	500.0	\$49.30	\$7.39	\$3,222.90	\$3,279.97
Electrodos	1.8369	62.5	\$114.81	\$17.22	\$5,003.77	\$5,267.14
Transformador de ignición	0.3043	100.0	\$30.43	\$4.56	\$828.81	\$867.40
Contactador	0.0972	81.3	\$7.89	\$1.18	\$264.66	\$274.11
Botonera	0.0972	31.3	\$3.04	\$0.46	\$198.54	\$202.40
Breakers	0.0972	150.0	\$14.57	\$2.19	\$264.66	\$281.79
Controlador de quemador	0.0971	1,125.0	\$109.28	\$16.39	\$330.76	\$456.81
Controlador de llama	0.1891	93.8	\$17.73	\$2.66	\$515.10	\$536.88
Suministro de energía eléctrica interna	0.1891	125.0	\$23.64	\$3.55	\$386.41	\$414.99
Pressuretrol de operación	0.0955	781.3	\$74.62	\$11.19	\$260.17	\$346.34
Manómetro de presión	0.4059	37.5	\$15.22	\$2.28	\$1,105.76	\$1,129.68
Manómetro de temperatura	0.4059	43.8	\$17.76	\$2.66	\$1,105.76	\$1,132.59
Válvula de control de gas	0.1865	375.0	\$69.94	\$10.49	\$9,144.24	\$9,226.02
Válvula reguladora de aire	0.1892	187.5	\$35.47	\$5.32	\$257.66	\$299.84
McDonnell	0.0326	3,125.0	\$101.84	\$15.28	\$798.96	\$916.12
Ventilador de motor	0.1889	250.0	\$47.24	\$7.09	\$1,029.37	\$1,085.08
Empaques de compuertas	0.3507	450.0	\$157.81	\$23.67	\$2,388.14	\$2,574.40
Visor de llama	0.4058	37.5	\$15.22	\$2.28	\$1,381.92	\$1,405.83
Empaques de quemador	0.1447	75.0	\$10.85	\$1.63	\$4,728.52	\$4,741.81
Visor de nivel de agua	0.6840	25.0	\$17.10	\$2.56	\$931.56	\$969.43
TOTAL						\$ 67,630.15

ANEXO J CÁLCULO DE RELACIÓN DE VARIABLES

Tabla J.1 Cálculo de la relación de Costos de mantenimiento e Indisponibilidad (Elaboración propia).

Componente	z	0.95				
	y	x				
	Costo Mto. (Propuesto)	Indisponibilidad	Costos + (z*error típico)	Costos - (z*error típico)	ecuacion	diferencia
CUERPO	\$ 1,128.27	0.000305	1,511.31	745.23	1,103.05	- 25.22
EMPAQUETADURA	\$ 889.69	0.000236	1,272.73	506.65	856.87	- 32.82
VÁLVULA DE PASO DE VAPOR	\$ 1,118.25	0.000319	1,501.29	735.20	1,152.85	- 34.61
CUERPO EXTERNO	\$ 2,747.41	0.000807	3,130.45	2,364.36	2,909.76	- 162.36
TUBERÍAS DE ALIMENTACIÓN DE AGUA CONDENSADA	\$ 968.40	0.000277	1,351.44	585.36	1,002.19	- 33.78
TUBERÍA DE PURGA	\$ 2,353.25	0.000689	2,736.29	1,970.21	2,485.77	- 132.53
SOPORTE	\$ 1,078.35	0.000320	1,461.39	695.30	1,159.55	- 81.21
VALVULAS DE SEGURIDAD	\$ 640.91	0.000157	1,023.95	257.87	572.83	- 68.08
CUERPO INTERNO	\$ 5,202.71	0.001600	5,585.75	4,819.67	5,761.80	- 559.09
QUEMADOR	\$ 7,481.15	0.001556	7,864.19	7,098.10	5,601.50	- 1,879.65
TUBOS DE HUMO	\$ 8,613.13	0.002281	8,996.17	8,230.08	8,210.15	- 402.97
CÁMARA DE COMBUSTIÓN	\$ 3,279.97	0.000966	3,663.01	2,896.93	3,479.58	- 199.61
ELECTRODOS	\$ 5,267.14	0.001485	5,650.19	4,884.10	5,347.53	- 80.39
TRANSFORMADOR DE IGNICIÓN	\$ 867.40	0.000246	1,250.45	484.36	892.81	- 25.41
CONTACTOR	\$ 274.11	0.000079	657.15	108.93	290.01	- 15.90
BOTONERA	\$ 202.40	0.000059	585.44	180.64	219.30	- 16.90
BREAKERS	\$ 281.79	0.000079	664.83	101.25	290.01	- 8.22
CONTROLADOR DE QUEMADOR	\$ 456.81	0.000098	839.85	73.76	360.72	- 96.08
CONTROLADOR DE LLAMA	\$ 536.88	0.000153	919.92	153.84	557.63	- 20.75
SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA INTERNA	\$ 414.99	0.000115	798.03	31.94	420.03	- 5.04
PRESSURETROL DE OPERACIÓN	\$ 346.34	0.000077	729.38	36.70	285.21	- 61.13
MANÓMETRO DE PRESIÓN	\$ 1,129.68	0.000329	1,512.72	746.64	1,188.66	- 58.98
MANÓMETRO DE TEMPERATURA	\$ 1,132.59	0.000329	1,515.64	749.55	1,188.66	- 56.06
VÁLVULA DE CONTROL DE GAS	\$ 9,226.02	0.002749	9,609.06	8,842.98	9,890.24	- 664.22
VÁLVULA REGULADORA DE AIRE	\$ 299.84	0.000077	682.88	83.20	282.41	- 17.43
MCDONELL	\$ 916.12	0.000239	1,299.16	533.08	866.48	- 49.64
VENTILADOR DE MOTOR	\$ 1,085.08	0.000306	1,468.13	702.04	1,107.96	- 22.87
EMPAQUES DE COMPUERTAS	\$ 2,574.40	0.000710	2,957.45	2,191.36	2,561.02	- 13.38
VISOR DE LLAMA	\$ 1,405.83	0.000411	1,788.87	1,022.79	1,483.91	- 78.08
EMPAQUES DE QUEMADOR	\$ 4,741.81	0.001416	5,124.86	4,358.77	5,099.48	- 357.66
VISOR DE NIVEL DE AGUA	\$ 969.43	0.000277	1,352.47	586.39	1,002.17	- 32.74
	\$ 67,630.15		\$ 79,504.45	\$ 55,755.85	\$ 67,630.15	-\$ 0.00

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.987557593							
R Square	0.97527							
Adjusted R Square	0.974417242							
Standard Error	403.2021498							
Observations	31							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	1	185927841.7	185927841.7	1143.664788	7.47878E-25			
Residual	29	4714587.235	162571.9736					
Total	30	190642429						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	7.145001658	96.84330546	0.073778994	0.941692798	-190.9217973	205.2118006	-190.9217973	205.2118006
X Variable 1	3595795.685	106327.5071	33.81811331	7.47878E-25	3378331.515	3813259.854	3378331.515	3813259.854

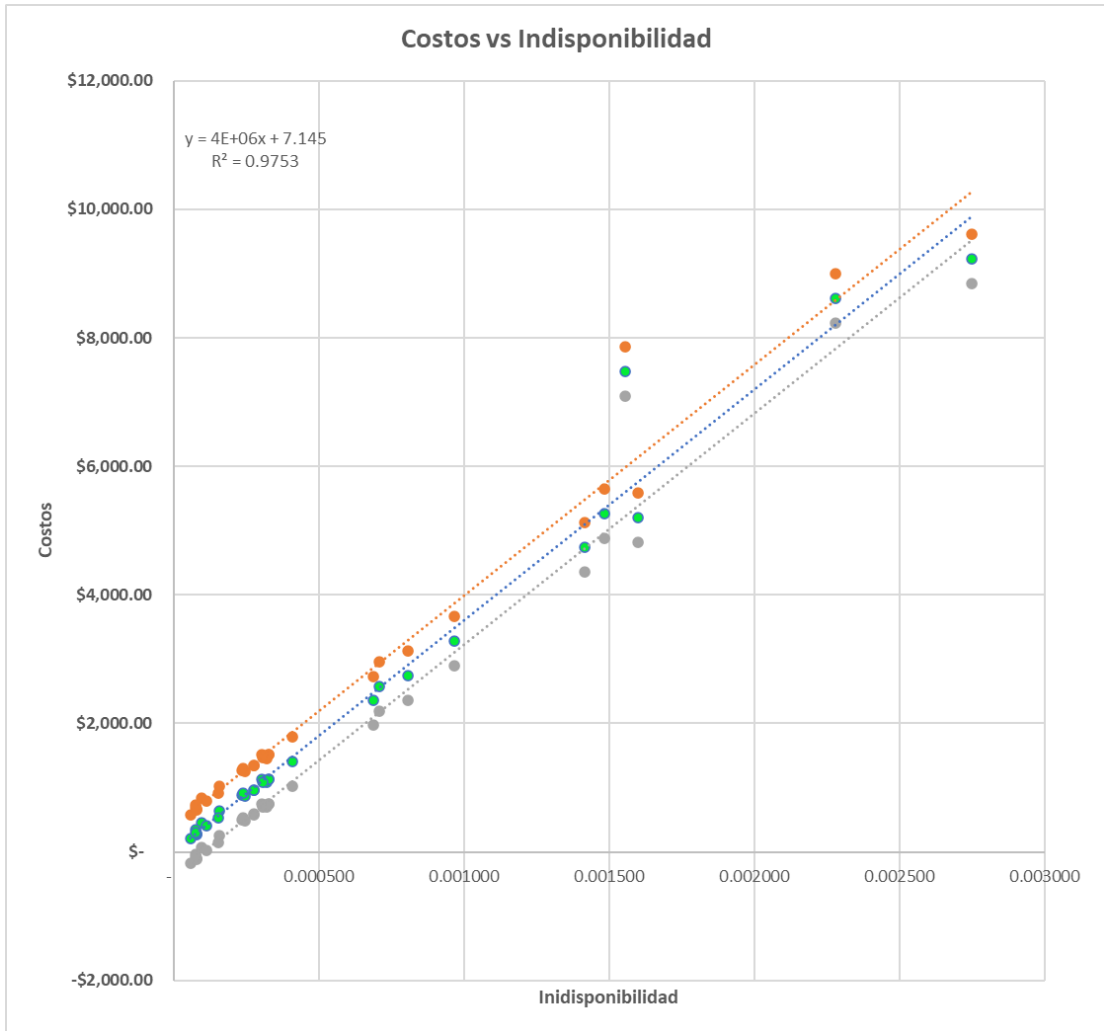


Figura J.1 Gráfica Costos de Mantenimiento vs Indisponibilidad (Elaboración propia).

ANEXO K AUDITORIA AMORMS (ASSET MANAGEMENT, OPERATIONAL RELIABILITY AND MAINTENANCE SURVEY)

Los resultados de la auditoría realizada al personal de la planta que brinda una imagen clara de la situación actual de la empresa desde un punto de vista mucho más riguroso, lo que permitió una valoración objetiva y focalizada de la misma, de las necesidades y las oportunidades de mejora que ésta posee; así como dar líneas para la posible implementación de modelos de gestión y políticas de mantenimiento. Promediando los resultados, la empresa textil se encuentra por debajo del estándar promedio de los procesos de gestión de mantenimiento, obteniendo una puntuación de 2.3, la cual se encuentra detallada en la tabla siguiente:

Tabla K.1 Puntuaciones individuales de parámetros evaluados en auditoría AMORMS en empresa textil.

1	Gestión de Activos, Objetivos del Negocios (KPI's) y organización de soporte	3.2
2	Modelos de Jerarquización basados en Riesgo (criticidad de equipos)	2.9
3	Análisis de problemas (manejo de fallas)	1.5
4	Procesos de programación y planificación	2.5
5	Procesos de asignación de recursos, soporte informático y logístico	1.9
6	Procesos de control y análisis de indicadores técnicos RAM	3.1
7	Proceso de análisis de costos de ciclo de vida	1.0
8	Procesos de revisión y mejora continua	2.4
PROMEDIO		2.3

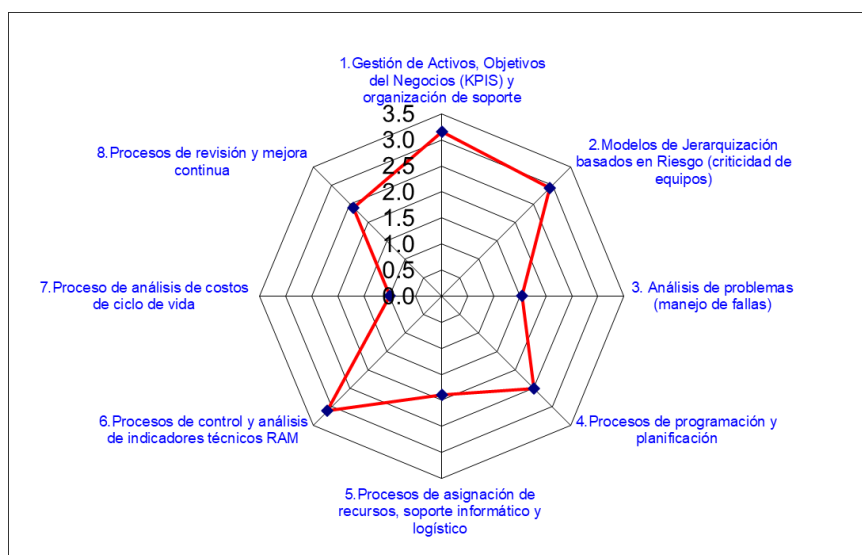


Figura K.1 Resultados Generales de auditoría AMORMS en la empresa textil (Elaboración Propia).

Al analizar la gráfica, se aprecia los porcentajes de distribución según su proceso:

1. Proceso muy deficiente. 25%
2. Proceso debajo del promedio. 37.5%
3. Proceso estándar promedio. 37.5%
4. Proceso con muy buenas prácticas. 0%
5. Proceso a nivel clase mundial. 0%

La empresa textil, respetando su política de confidencialidad, no brinda información relacionada con variables sensitivas del negocio.

Gestión de activos, objetivos del negocio (KPI's) y organización de soporte.

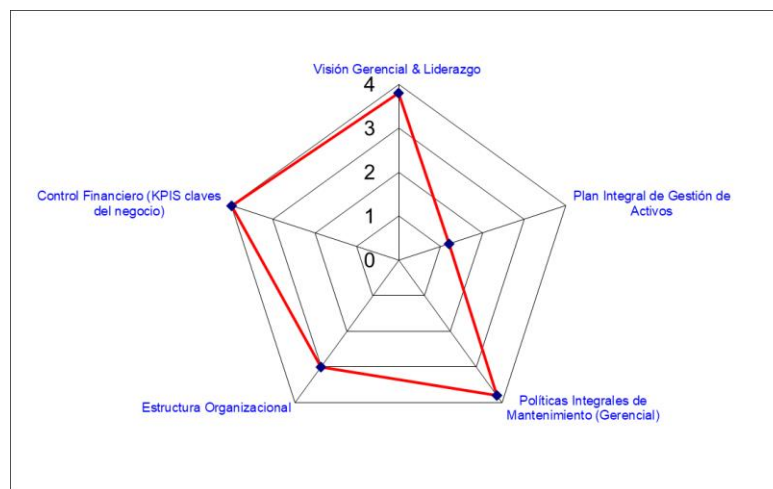


Figura K.2 Resultados Fase 1 (Elaboración Propia).

Observaciones conforme el análisis de la fase 1:

- La empresa textil no tiene por el momento proyectado adherirse a una gestión de activos (por ejemplo, la norma ISO-55000).
- Existe un Plan estratégico de gestión de mantenimiento en general, sin conocimiento total de las diversas personas entrevistadas.
- Hay algunas áreas de control, que no están claramente reguladas por políticas y procedimientos formales de mantenimiento, responsabilidad y transparencia sobre las actividades de mantenimiento.

Modelo de Jerarquización basado en Riesgo (criticidad de equipos).

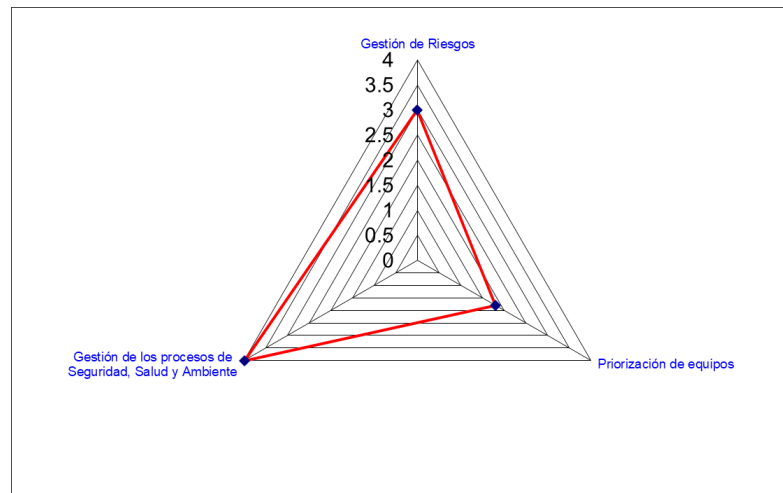


Figura K.3 Resultados Fase 2 (Elaboración Propia).

Observación conforme el análisis de la fase 2:

No existe un proceso establecido para la determinación de la criticidad de los equipos, se trabaja más que todo conforme la disponibilidad, porque mantienen equipos en standby.

Análisis de problemas (manejo de fallas)

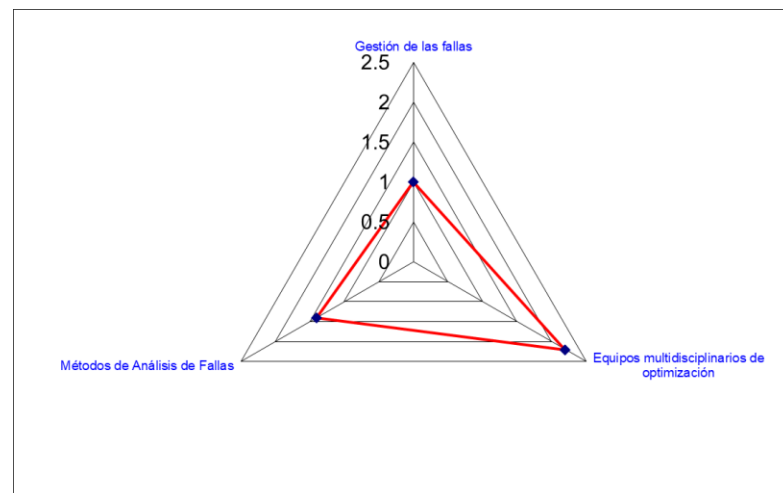


Figura K.4 Resultados Fase 3 (Elaboración Propia).

Observación conforme el análisis de la fase 3:

- No se realiza un seguimiento y control de los informes de análisis de causa raíz, no hay planes de acción definidos.
- Los resultados de los análisis no se comunican de forma eficiente a la organización.

Procesos de programación y planificación.

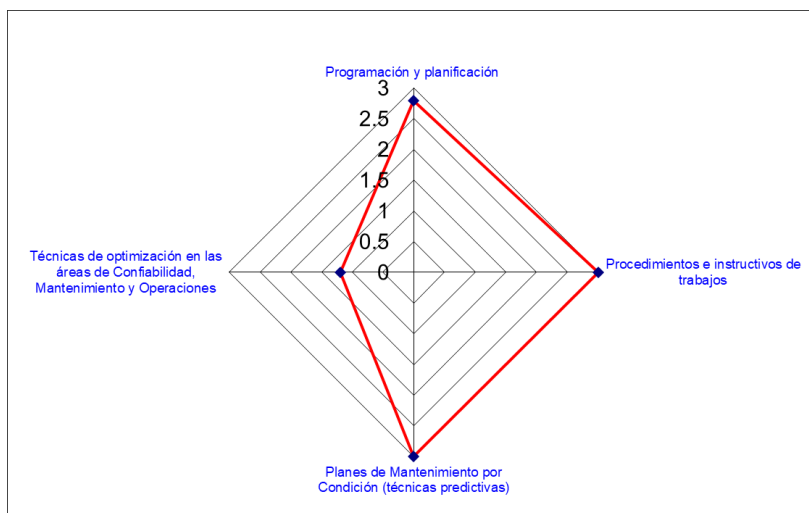


Figura K.5 Resultados Fase 4 (Elaboración Propia).

Observación conforme el análisis de la fase 4:

- Existe un punto de mejora en parte de documentación requerida para una buena gestión, tales como conseguir más procedimientos e información técnica que acompañe al plan de trabajo.
- Los planes de mantenimientos predictivos tienen poca visibilidad (o impacto) dentro de los planes de mantenimiento.

Procesos de asignación de recursos, soporte informático y logístico.

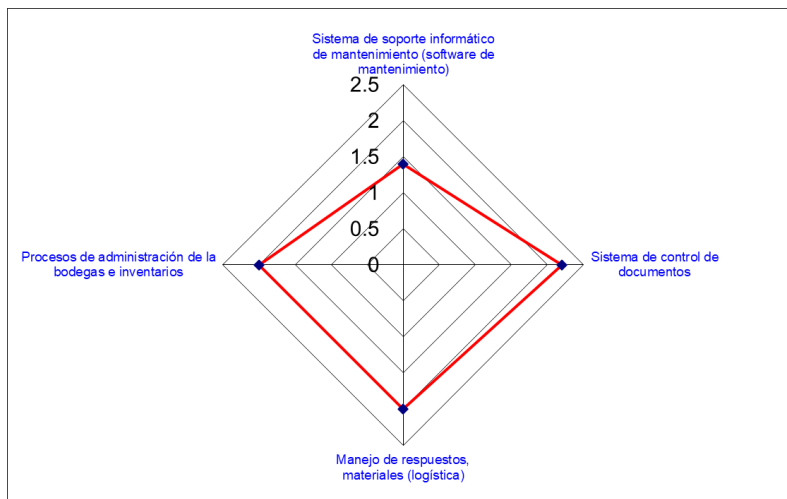


Figura K.6 Resultados Fase 5 (Elaboración Propia).

Observación conforme el análisis de la fase 5:

- El 100% de los procedimientos técnicos contemplados en los planes de mantenimiento tanto preventivos como correctivos se llevan en Excel.

- La documentación de análisis de OT no es la adecuada, y la revisión para análisis de estas es nula.

Procesos de control y análisis de indicadores técnicos RAM.

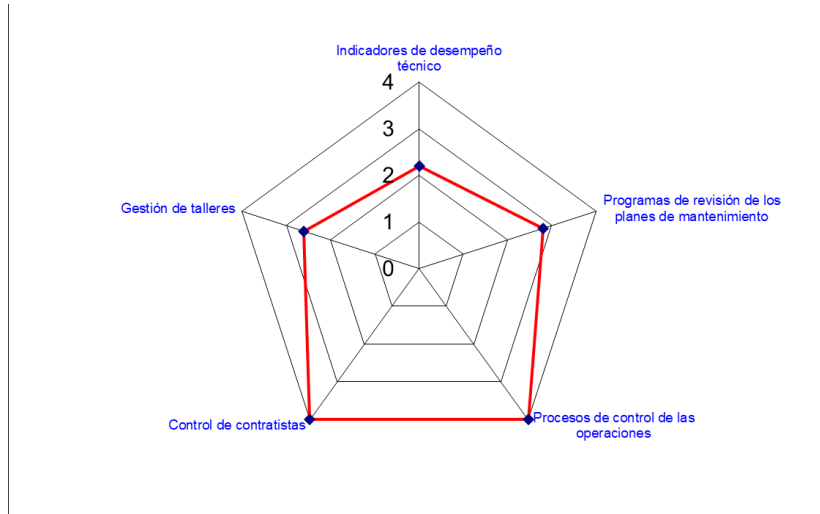


Figura K.7 Resultados Fase 6 (Elaboración Propia).

Observación conforme el análisis de la fase 6:

- A pesar de que la empresa tiene un indicador de eficiencia, se necesita mejorar la confiabilidad y disponibilidad de la información. Dicha información debería ser analizada y compartida con el departamento de mantenimiento para que esta sea utilizada con el fin de organizar y programar actividades de mantenimiento en tiempo oportuno, aumentando la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, y de esta forma disminuir costos.
- Existe poca atención en el seguimiento a 2 indicadores que son el MTTF y el MTTR, pues la empresa no los considera al momento de tomar decisiones para optimizar la programación de mantenimiento; incluirlos en el análisis mejoraría la gestión de mantenimiento y ayudaría a cumplir los objetivos de la empresa.

Proceso de análisis de costos de ciclo de vida.

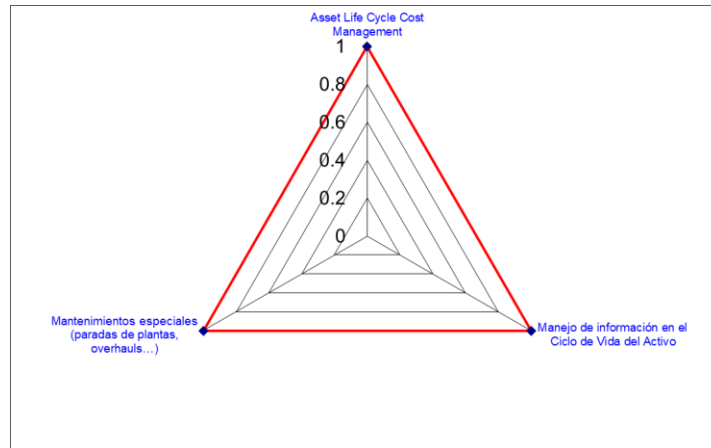


Figura K.8 Resultados Fase 7 (Elaboración Propia).

Observación conforme el análisis de la fase 7:

- En esta fase se tiene como principal hallazgo la no existencia de mediciones del Ciclo de vida de los activos. Es importante la implementación de una herramienta de análisis, ya que la determinación del ciclo de vida de un activo es una decisión económica, además es la forma más efectiva para determinar la estrategia de mantenimiento asociada a un sistema.

Proceso de revisión y mejora continua.

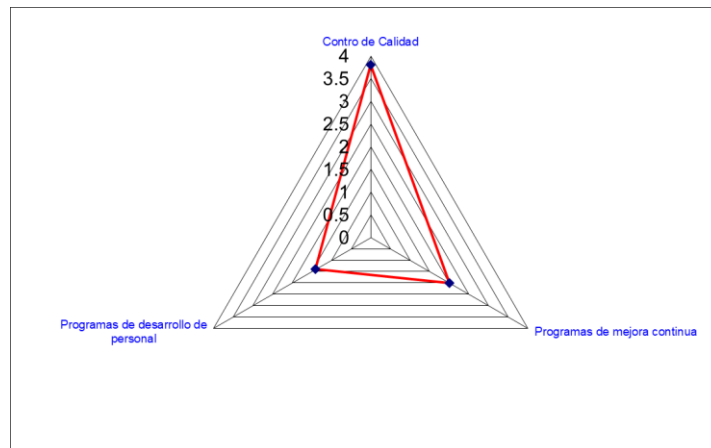


Figura K-9 Resultados Fase 8 (Elaboración Propia).

Observación conforme el análisis de la fase 8:

- Se cuenta con un plan de carrera y/o de mejora profesional para los integrantes del área de mantenimiento.